



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위청구논문

디지털 이미지 해석 기법을 이용한
매립토사의 침강 특성 분석

**Analysis of Settling Characteristic of Landfill Soil
using Digital Image Processing**

2016년 2월

서울대학교 대학원

생태조경 · 지역시스템공학부

지역시스템공학 전공

김 동 근

디지털 이미지 해석 기법을 이용한
매립토사의 침강 특성 분석
**Analysis of Settling Characteristic of Landfill Soil
using Digital Image Processing**

지도교수 손 영 환

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2016년 1월

서울대학교 대학원
생태조경 · 지역시스템공학부
지역시스템공학전공
김 동 근

김 동 근의 공학석사 학위논문을 인준함
2016년 1월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

준설 매립을 수행함에 있어 가장 중요한 것은 목표한 위치에 정확한 수량을 투하하는 것이다. 투하된 토사는 물의 흐름 또는 투기된 토사 자체의 움직임으로 인해 유실이 발생하며 이에 대한 기준으로 항만 및 어항설계 기준 및 해설에서는 입경에 따른 개략적인 유실율만을 제시하고 있다. 하지만 실제 유실율은 매립 토사의 입경 및 형상에 따른 침강특성의 차이로 인해 예측과 다소 상이하게 나타나며 또한 입경이 1.2mm이상인 경우 유실율을 0%로 제시하고 있으나 실제로 유실이 발생하므로 1.2mm이상의 입경을 가지는 입자의 침강거동을 파악하는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 디지털 이미지 해석(Digital Image Processing)기법을 적용하여 입자의 형상 특징, 침강궤적 및 침강속도 산정을 실시하여 입자의 형상과 침강거동과의 관계를 분석하였다. 화강풍화토 중 평균 1~10mm의 입경을 가진 입자들을 대상으로 실험을 수행하였으며 입자의 형상 및 침강속도 측정을 수행하였다. 입자의 형상 측정은 개별 입자를 대상으로 수직방향에서 촬영한 디지털 이미지를 이용하였으며 침강실험을 위해 높이 100cm, 폭 30cm, 두께 8cm의 직사각형 수조를 이용하였다. 획득한 디지털 이미지는 그레이스케일화 후 최적의 임계값을 기준으로 흑/백 이진화를 수행하였으며, 추적 입자의 위치정보를 통해 개별 입자의 침강궤적 및 침강속도를 산정하였다.

입자의 형상 측정 결과, 원마도는 평균 0.72로 크게 모나지 않은 형태이며 종횡비는 평균 2.24로 긴 형태의 입자가 다수 존재하는 것으로 나타났다. 침강궤적 분석 결과 입자는 침강 시 수평방향으로 유동하거나 불규칙하게 운동하며 침강하는 것으로 나타났다. 침강속도는 입경이 작을수록 감소하였으며 평균직경이 같은 경우에도 침강속도 간에 최대 3배의 차이를 보였다. 이는 평균직경이 같은 경우임에도 불구하고 입자의 형상이 상이하기 때문이며, 입자 형상과의 비교 결과 입자의 종횡비가 클수록 침강속도가 감소하는 것으로 나

타났다. 획득한 결과를 이용하여 회귀분석을 실시하였으며 입자의 크기, 형상을 고려한 침강속도 예측식을 제안하였다.

본 연구를 통해 이미지 해석 기법을 이용하여 모래의 침강속도 측정이 가능함을 확인하였으며, 향후 수중 모래 이동 모델의 기초자료로써 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 매립토사, 디지털이미지해석기법, 형상, 침강궤적, 침강속도

학 번 : 2014-20054

목 차

목 차	i
List of Tables	iii
List of Figures	iv
제 1 장 서 론	1
제 2 장 연구사	3
2.1 조립입자의 침강속도	3
2.2 지반 공학 분야에서의 디지털 이미지 해석 관련 연구	5
제 3 장 이론적 배경	7
3.1 유체 내에서의 입자의 침강	7
3.2 토립자의 형상분류	8
3.2.1 형상분류표	8
3.2.2 원마도	9
3.2.3 종횡비	11
3.3 디지털 이미지 해석	11
3.3.1 디지털 이미지	11
3.3.2 히스토그램	13
3.3.3 임계치	15
3.3.4 이진 영상 변환	17

제 4 장 재료 및 방법	19
4.1 실험재료	19
4.2 실험방법	21
4.2.1 디지털 이미지의 획득	21
4.2.2 입자 형상 특성 추출	22
4.2.3 침강궤적 및 침강속도 산정	25
제 5 장 결과 및 고찰	30
5.1 매립 토사의 형상 특성	30
5.1.1 형상분류표를 이용한 매립 토사의 형상 분류	30
5.1.2 DIP를 통해 측정한 매립 토사의 형상 특성	31
5.2 매립 토사의 침강거동	36
5.2.1 매립 토사의 침강궤적	36
5.2.2 매립 토사의 침강속도	40
5.3 형상 특성에 따른 침강거동	41
5.3.1 형상분류에 따른 침강속도	41
5.3.2 DIP를 통해 측정한 형상 특성에 따른 침강속도	42
5.4 형상 특성을 이용한 침강속도 예측식 개발 및 검증	52
5.4.1 형상 특성을 이용한 침강속도 예측식 개발	52
5.4.2 형상 특성을 이용한 침강속도 예측식 검증	53
제 6 장 결론	55
참고 문헌	56

List of Table

Table 3.1 Roundness of Particles	10
Table 4.1 Physical Properties of Weathered Soil	21
Table 5.1 Error of Measuring by Digital Image Processing	32
Table 5.2 Statistic Properties of Shape Properties	33

List of Figures

Fig. 3.1 Shape of Particles (Lee et al, 1983)	8
Fig. 3.2 Dimension of Particles	9
Fig. 3.3 Roundness of Particles (Powers, 1953)	10
Fig. 3.4 Chart for Visual Determination of Roundness (Krumbein 1941) ...	10
Fig. 3.5 Aspect Ratio of Particle	11
Fig. 3.6 Description of 24Bit RGB color	12
Fig. 3.7 EXIF Data of Digital Image	13
Fig. 3.8 Histogram of Digital Image	14
Fig. 3.9 Bimodal Histogram of an Image	15
Fig. 3.10 Example of Binarization	18
Fig. 4.1 Test Procedure	19
Fig. 4.2 Grain size distribution of weathered Soil	20
Fig. 4.3 Apparatus for Aquisition of Digital Image	22
Fig. 4.4 Procedure of Aquisition of Shape Properties	23
Fig. 4.5 Procedure of Binarization	24
Fig. 4.6 Shape Properties from Digital Image Processing	25
Fig. 4.7 Apparatus for Settling Test	26
Fig. 4.8 Divided Images by Frame	27
Fig. 4.9 Procedure of Binarization by R	28
Fig. 4.10 Position of Particles by Frame	28
Fig. 4.11 Trajectory and Settling Velocity of Particle	29
Fig. 5.1 Shape of Landfill Soil	31
Fig. 5.2 Image for Verification of Measuring by DIP	32
Fig. 5.3 Histogram of Shape Properties of Landfill Soil	34

Fig. 5.4 Shape Properties Compared with Mean Diameter of Landfill Soil	35
Fig. 5.5 Settling Trajectory of Landfill Soil (overall)	36
Fig. 5.6 Settling Trajectory of Landfill Soil (6 samples)	37
Fig. 5.7 Histogram of Averaged Horizontal Distance	38
Fig. 5.8 Increase in Averaged Horizontal Distance through Particle Diameter ...	39
Fig. 5.9 Settling Velocity of Landfill Soil	40
Fig. 5.10 Settling Velocity of Landfill Soil classified with Particle Shape ..	42
Fig. 5.11 Settling Velocity and Regression Line by Mean Diameter	43
Fig. 5.12 Standardized Residual of Settling Velocity	43
Fig. 5.13 Standardized Residual of Settling Velocity versus Area	44
Fig. 5.14 Standardized Residual of Settling Velocity versus Aspect Ratio ·	44
Fig. 5.15 Standardized Residual of Settling Velocity versus Major Axis ...	45
Fig. 5.16 Standardized Residual of Settling Velocity versus Minor Axis ...	45
Fig. 5.17 Standardized Residual of Settling Velocity versus Max Diameter	46
Fig. 5.18 Standardized Residual of Settling Velocity versus Min Diameter	46
Fig. 5.19 Standardized Residual of Settling Velocity versus Max Radius ·	47
Fig. 5.20 Standardized Residual of Settling Velocity versus Min Radius ...	47
Fig. 5.21 Standardized Residual of Settling Velocity versus Perimeter	48
Fig. 5.22 Standardized Residual of Settling Velocity versus Radius Ratio ·	48
Fig. 5.23 Standardized Residual of Settling Velocity versus Roundness	49
Fig. 5.24 Standardized Residual of Settling Velocity versus Fractal Dimension ...	49
Fig. 5.25 Correlation Coefficient of Shape Factor with Residual of Settling Velocity ..	50
Fig. 5.26 Settling Velocity of Landfill Soil through Aspect Ration	51
Fig. 5.27 Comparison of Observed/Predicted Settling Velocity	53
Fig. 5.28 Verification of Estimation Formula for 106 Samples	54

제 1 장 서 론

준설 매립을 수행함에 있어 가장 중요한 것은 목표한 위치에 정확한 수량을 투하하는 것이다. 투하된 토사는 물의 흐름 또는 투기된 토사 자체의 움직임으로 인해 유실이 발생하며 이러한 토사의 유실량은 유실율 및 유보율로 정의된다. 유실율은 투하된 토사의 전체 수량 대비 유실되는 토사의 비율이며 유보율은 유실되지 않은 토사의 비율이다. 항만 및 어항 설계기준 및 해설에서는 입경에 따른 유실율만을 제시하고 있으나 실제로 매립 토사는 입경 및 형상에 따른 침강특성의 차이로 인해 실제 유실율은 예측과 다소 상이하게 나타나기 때문에 현장에서는 시공 시 별도로 시험포를 운영하여 유실율을 평가하고 있는 실정이다. 또한 입경이 1.2mm이상인 경우 유실율을 0%로 제시하고 있으나 실제로 사석등과 같은 매우 큰 입자도 유실이 보고되고 있기 때문에 매립 토사 중 1.2mm이상의 입경을 가지는 입자에 대한 유실율에 대한 확인이 필요하다.

입자의 유실율을 파악하기 위해서는 수중에서의 침강거동에 대한 파악이 필요하다. 수중에서 입자의 침강거동은 수직방향과 수평방향으로 구분할 수 있으며 수직방향의 침강거동, 즉, 침강속도는 다수의 연구자에 의해 연구가 진행되어 왔다. 입자의 침강속도에 대해 다수의 연구자들은 구형입자에 대해 입자의 직경과 환경조건에 따른 침강속도 산정식을 제시하고 있으며, 구형이 아닌 입자의 형상을 고려한 경우 이를 형상계수로 도입하여 기존의 침강속도식을 보완하고 있다. 연구자들마다 상이한 형상계수를 제시하고 있으며 형상계수는 일반적으로 실측을 통해 산정한 입자의 3차원적인 형상을 고려하여 산정되기 때문에 광범위한 적용에 어려움이 있다.

입자의 수평방향의 거동을 파악하기 위해서는 침강 중 입자의 시간 별 위치 즉, 침강궤적을 정확히 산정해야 한다. 이를 위한 측정하기 위한 방법으로 디지털 이미지 처리(DIP, Digital Image Processing)기법이 적용될 수 있다. DIP

기법은 촬영된 이미지를 이용하여 원하는 정보를 추출하는 과정이다. 이는 대상 물체의 위치나 형상 등을 분석하는데 매우 용이하며 또한 측정기법이 단순하고 저렴하게 시스템을 구성할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 매립토사 중 입자크기가 큰 조립입자를 대상으로 디지털 이미지 해석 기법을 적용하여 입자의 형상 및 크기를 고려하여 정수중의 침강거동을 분석하고자 한다. 우선적으로 입자의 형상에 대한 기존 분류 방법과 DIP기법을 통해 산정한 입자 형상 특성과의 비교를 통해 매립토사의 형상 특성을 파악하고자 한다. 또한 DIP기법을 적용하여 입자의 침강궤적을 정량적으로 산출하여 매립토사의 침강거동을 분석하고자 하며 입자의 형상 및 크기와 침강속도와의 관계를 파악하여 침강속도 예측식을 제시하고자 한다. 마지막으로, 본 연구에서 제안한 입자의 침강속도 예측식의 적용성을 평가하기 위해 타 지역 화강풍화토의 침강실험결과와 예측된 결과와의 비교 분석을 수행하고자 한다.

제 2 장 연구사

2.1 조립입자의 침강속도

수중에서 토립자의 침강은 물의 환경 조건, 외부 환경 조건 및 흙 입자의 조건 등에 큰 영향을 받는다. 물의 환경 조건은 유속, 온도, 염분농도 등이 있으며 외부 환경 조건은 강우나 풍속 등이 있다. 흙 입자의 조건은 침강하는 입자의 크기, 밀도, 형상 등이 있으며 이에 따라 입자 별로 침강 현상이 상이하게 나타난다. 이와 같이 수중에서 토립자의 침강은 매우 다양한 요소에 의해서 영향을 받기 때문에 이를 예측하는 것은 복잡하고 난해하다.

토립자의 침강에 대한 초기 연구로는 구형 입자에 대한 침강속도 (Stokes, 1851; Ladenburg, 1907; Ossen, 1910; Goldstein, 1929)에 관한 연구와 부정형 입자에 대한 침강속도 (Rubey, 1933; Rouse, 1936; Krumbein & Pettjohn, 1938)등이 있다. 초기 연구들은 입자의 크기, 밀도, 수온 등에 따른 침강속도를 측정하고 이를 예측하는데 주안점이 있다. 이후 수중 토립자의 침강에 대한 다양한 연구가 지속되었으며 (Janke, 1965; Gibbs et al., 1971; Dietrich, 1982; Le Roux, 1996; Cheng, 1997; Ahrens, 2000; Ferguson & Church, 2004; Wu & Wang, 2006; Camenen, 2007; Zhiyao, 2008; Joshi et al, 2014; Farrell & Sherman, 2015 등), 많은 연구에서 입자의 형상계수를 도입하여 입자의 크기 및 형상에 따른 침강속도를 예측하고자 하였다. 국내에서는 미립자의 침강에 대한 연구 (Kim, 2007; Hwang et al., 2008; Kim et al., 2009)가 주로 수행되었다.

Gibbs et al. (1971)은 Stokes법칙이 적용되지 못하는 직경 $50\mu\text{m} \sim 5000\mu\text{m}$ 크기의 구형 입자를 대상으로 크기, 밀도, 수온, 유체의 염농도 등을 변화시키며 침강속도를 측정하였으며 직경 $0.1\mu\text{m} \sim 6\text{mm}$ 범위의 입자에 적용되는 경험식을 아래와 같이 제시하였다. 특히, 수온이 $5^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 일 때에는 입자

의 침강속도가 수온에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

$$V = \frac{-3\eta + \sqrt{9\eta^2 + gr^2P_f(P_s - P_f)(0.015476 + 0.19841r)}}{P_f(0.01607 + 0.14881r)} \quad (2.1)$$

여기서, V = settling velocity in cm/sec

η = dynamic viscosity of fluid in poises

g = acceleration of gravity in cm/sec²

r = sphere radius in cm

P_f = density of fluid in g/cm³

P_s = density of sphere in g/cm³

Ferguson & Church (2004)는 점성유체와 난류 모두에 적용 가능한 간단한 양함수 형태의 침강속도 예측식을 제시하였다. 제시된 식 (2.2)는 입자의 크기에 관계없이 적용이 가능하며 입자의 형상에 따른 침강속도의 차이를 보정하기 위해 보정계수를 도입하였다.

$$V = \frac{RgD^2}{C_1\nu + (0.75C_2RgD^3)^{0.5}} \quad (2.2)$$

여기서, V = settling velocity

R = submerged specific gravity

g = acceleration of gravity

D = particle diameter

C_1 = constant(18 for smooth spheres)

C_2 = constant(0.4 for smooth spheres)

ν = kinematic viscosity of fluid

Wu & Wang(2006)은 기존 연구들의 침강속도 측정결과를 바탕으로 퇴사의 초기 공극률과 침강속도를 추정하고자 하였다. 입자의 형상을 고려하기 위해 형상계수 S_f 를 포함하고 있으며 제시된 침강속도 예측식은 식 (2.3)과 같다.

$$V = \frac{M\nu}{Nd} \left[\sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{4N}{3M^2} D_*^3 \right)^{\frac{1}{n}}} - \frac{1}{2} \right]^n \quad (2.3)$$

여기서, V = settling velocity

$$M = 53.5e^{-0.65S_f}, \quad N = 5.65e^{-2.5S_f}, \quad n = 0.7 + 0.9S_f$$

S_f = Corey shape factor (1.0 for spheres)

$$D_* = d[(\rho_s/\rho - 1)g/\nu^2]^{1/3}$$

d = nominal diameter of particle

ρ_s = density of particle

ρ = density of water

g = acceleration of gravity

2.2 지반 공학 분야에서의 디지털 이미지 해석 관련 연구

디지털 이미지 해석(DIP, Digital Image Processing)기법은 스캐너, 디지털 카메라 등의 장치로부터 획득한 디지털 이미지를 이용하여 원하는 정보를 획득하는 과정을 의미한다. DIP관련 연구는 1950년대 영상처리 이론 개발 및 군사적 목적으로 연구가 시작되었으며 현재 의학, 생물학, 지리학, 재료공학 등 수많은 연구 분야에 광범위하게 적용되고 있다. 농지·지반공학 분야에서는 지반 내부의 물질 이동 경로의 추정, 흙의 변위 정량화, 지반의 특성 추정 등에 이용되고 있다. 또한 디지털 이미지에서 입경이나 형상을 간단하게 획득하여 정량화 할 수 있기 때문에 조립토의 입도분석 등의 연구에 활용되고 있다.

디지털 이미지 상에 나타난 대상체의 색상변화를 이용한 연구로 Lee et al. (2010)은 위성영상의 색상정보를 이용하여 간척지 토양의 염농도 분포를 추정하고자 하였고, Firdaus et al. (2014) 용액의 RGB값을 이용하여 Cr, Fe이온의 농도를 추정하였다. 조립토의 입도분석에 관한 연구로 Persson (1998)은 조립토의 크기와 형상을 DIP를 이용하여 분석하였고, Fernlund (1998)은 DIP를 이용하여 체 분석에 의한 입도 분석 시 입자의 형상이 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 또한 Mora et al. (1998)은 DIP를 이용하여 조립토의 입도분석을 수행하였다. Choo et al. (2012)은 연직 배수재 삽입 시 스미어 효과를 평가하였으며 Stephen et al. (2012)은 지반의 건조에 따른 파괴 형상 관측하였다. Coster et al. (2001)과 Lindqvist et al. (2001)은 DIP기법의 지반공학 분야에서의 적용성에 대해 연구하였다.

이와 같이 DIP기법은 지반공학 분야에서 대상체의 색상변화, 변위를 측정하는데 주로 활용되고 있으며 디지털 카메라의 발전과 함께 그 활용 범위가 더욱 늘어날 것으로 판단된다.

제 3 장 이론적 배경

3.1 유체 내에서의 입자의 침강

유체 내에서의 입자의 침강은 크게 자유침강 (free settling)과 간섭침강 (hindered settling)으로 구분 가능하다. 자유침강은 입자가 유체의 용기벽과 인접 입자로부터 충분히 먼 거리에 있으면 입자의 낙하운동은 용기벽이나 인접 입자의 흐름형태로부터 영향을 받지 않는 경우를 말한다. 간섭침강은 입자가 인근 입자와 실제로 충돌하지 않더라도 입자의 운동이 다른 인근 입자로부터 방해 받는 경우를 말한다. 간섭침강의 저항계수는 자유침강의 저항계수보다 더 크다.

입자가 매우 작으면 브라운운동 (Brownian movement)이 나타난다. 이 운동은 입자와 그 주위에 있는 유체의 분자간의 충돌로 인하여 입자에 주어지는 불규칙한 운동 (random motion)으로서, 입도가 $2\sim 3\mu\text{m}$ 일 때 상당한 영향을 나타내고, 입도가 $0.1\mu\text{m}$ 이하일 때는 중력의 영향보다 우세해서 중력침강의 효과가 크게 줄어들고, 중력침강이 일어나지 않는다. 이러한 때는 원심력을 이용함으로써 브라운운동의 효과를 상대적으로 줄일 수가 있다.

3.2 토립자의 형상분류

3.2.1 형상분류표

Lee et al (1983)은 토립자의 형상을 분류하기 위해 Fig. 3.1과 같은 형상분류표를 제시하였다. 형상분류표를 통한 분류에서 입자의 외부 경계들 사이의 거리 중 Fig. 3.2와 같이 장축의 길이는 A, 중간축의 길이는 B, 그리고 단축의 길이는 C라 정의되며 elongation ratio ($=B/C$)와 flatness ratio ($=C/B$)의 관계에 따라 입자의 형상을 9개의 기하학적인 형상으로 분류하였다. 형상분류표를 통한 입자 형상의 분류는 입자의 3차원적인 형태를 고려하며, 자연계에 존재하는 모든 입자의 형태를 간략하게 분류할 수 있다는 점에서 합리적이거나 분류를 위해 장축, 중간축, 단축을 모두 측정해야하기 때문에 다수의 입자에 대해 적용하기에는 어려움이 있다.

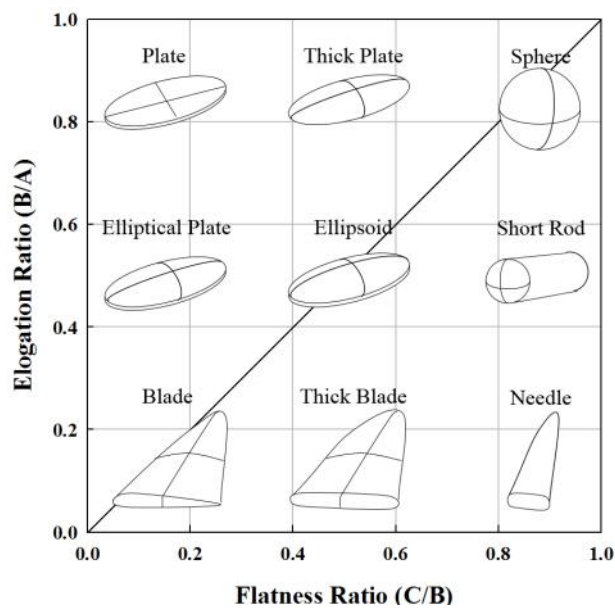


Fig. 3.1 Shape of Particles (Lee et al, 1983)

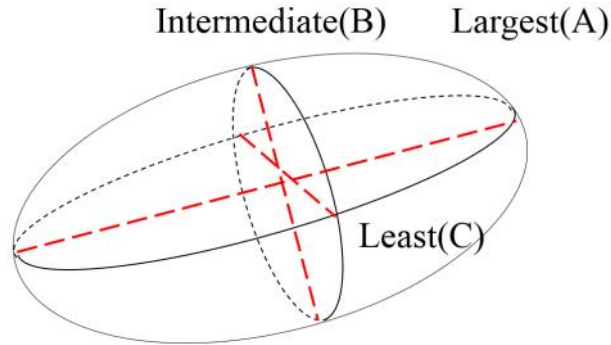


Fig. 3.2 Dimension of Particles

3.2.2 원마도

원마도는 입자 경계부의 모난 정도를 나타내는 지표이며 식 (3.1)과 같이 산정된다.

$$Roundness = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (3.1)$$

여기서, A = area of particle

P = perimeter of particle

완벽한 원형 입자의 원마도는 1이며 입자의 형상에 따라 Table 3.1, Fig. 3.3와 같이 분류된다. 원마도는 입자의 크기, 물리적인 특성 및 마모되는 기간과 관계가 있으며 일반적으로 Fig. 3.4의 Krumbein Chart (Krumbein, 1941)를 이용하여 분류하나 관찰자의 주관 및 낮은 분별력에 의해 정밀하게 측정하기가 어렵다.

Table 3.1 Roundness of Particles

Shape	Roundness
Well rounded	0.60~1.00
Rounded	0.40~0.60
Sub-rounded	0.25~0.40
Sub-angular	0.15~0.25
Angular	0.00~0.15
Very angular	for grains extremely sharp edges

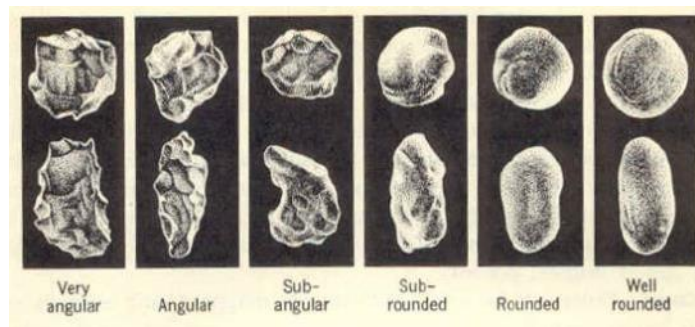


Fig. 3.3 Roundness of Particles (Powers, 1953)

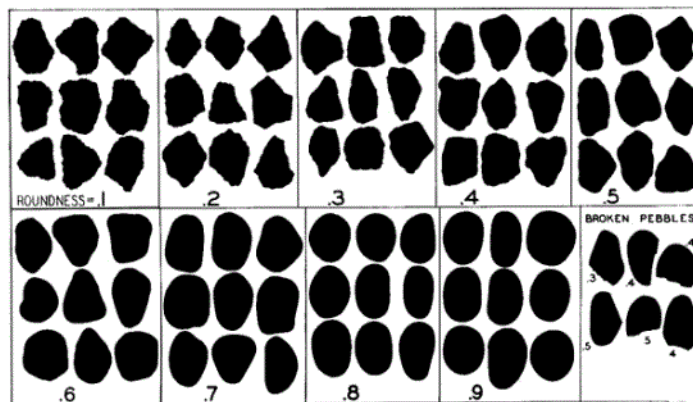


Fig. 3.4 Chart for Visual Determination of Roundness (Krumbein 1941)

3.2.3 종횡비

종횡비는 최대 직경과 최소 직경의 비로 식 (3.2)와 같이 산정되며 입자의 크기에 관계없이 나타나는 무차원의 값이다. 이는 이미지 해석이나 현미경 관찰법에서 입자의 형상을 분류하기 위해 쓰이는 지표이며 완전한 구형입자의 종횡비는 1이고 입자가 긴 형태일수록 종횡비가 1보다 크게 나타난다.

$$A_R = \frac{D_{max}}{D_{min}} \quad (3.2)$$

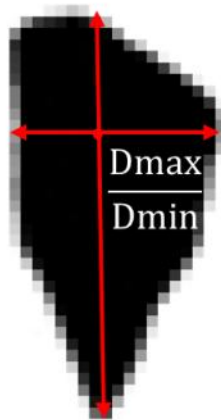


Fig. 3.5 Aspect Ratio of Particle

3.3 디지털 이미지 해석

3.3.1 디지털 이미지

디지털 이미지는 컴퓨터가 판독할 수 있도록 디지털화된 이미지를 일컬으며, 2차원함수 $f(x,y)$ 로 정의될 수 있다. 디지털 이미지는 아주 작은 사각형인 픽

셀단위로 이루어져 있으며, 각 픽셀의 위치는 공간좌표값 (x, y)로, 그 위치에 해당하는 영상의 색상은 f로 정의된다. Fig. 3.6과 같이 RGB색 공간에서 영상의 색상 f는 RGB(Red, Green, Blue)의 세 가지 색상의 조합으로 표현이 되며, 8비트(bit) 컬러 깊이(color depth)에서는 Red, Green, Blue가 각각 $2^8 = 256$ 개의 진하고 연한 색상으로 나뉜다. 즉, 한 픽셀은 24비트(bit)로써 $2^8 \times 2^8 \times 2^8 \approx 1670$ 만 종류의 색 정보를 가질 수 있다.



Fig. 3.6 Description of 24Bit RGB color

일반적으로 디지털 이미지는 이미지 자체에 대한 정보뿐만 아니라 촬영 당시의 관련 정보를 저장하는데 이를 교환이미지 파일형식 (EXIF, Exchangeable image file format)이라 한다. 이는 화상 데이터와 함께 카메라 제조사 (Maker), 카메라 모델 (Model), 이미지 에디터 (Software), 사진을 보정한 날짜 (Datetime), Exif 버전 (Exif Version), 촬영한 날짜 (Shoot Datetime), 웹에 올려진 사진의 실제 크기 (Image Size), 노출 시간 (Exposure Time: 셔터 스피드), 촬영 프로그램 (Exposure Program), 렌즈 초점 길이 (Focal Length), 조리개 개방 수치 (F-Number), 플래시 사용 여부 등과 같은 정보를 포함한다. 특히, 위성항법장치 (GPS) 수신기에서 오는 위치 정보 등을 카메라 연결하거나 카메라 자체에 위성항법장치가 포함된 경우 촬영당시의 위치정보 또한 포함이 가능하다.

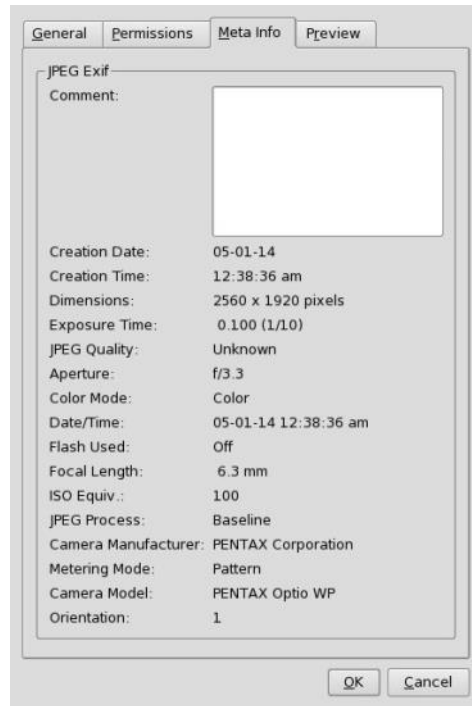


Fig. 3.7 EXIF Data of Digital Image

3.3.2 히스토그램

일반적으로 그레이 레벨 영상에서 영상 히스토그램은 영상 내 특정 밝기 값을 갖는 화소의 발생 빈도를 나타내는 수의 집합이다. 따라서 화소의 밝기 값을 x축 그리고 각 밝기 값의 발생 빈도를 y축으로 나타낸 그래프가 히스토그램이다.

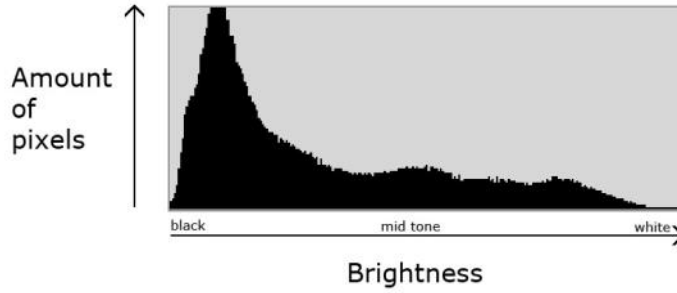


Fig. 3.8 Histogram of Digital Image

0부터 255의 밝기 값 범위를 갖는 흑백 영상의 경우 256개의 그레이 레벨을 갖는다. 만일 8비트 정수 G_i 를 i 번째 단계의 밝기 값으로 정의한다면, G_{100} 은 영상의 밝기 값이 100임을 의미한다. 특정 영상 내 화소의 전체 개수를 n_t 라고 하면 크기가 512×512 인 영상의 경우 영상 전체 화소의 개수는 $n_t = 262,144$ 이다. 영상 내 특정 밝기 값 G_i 를 갖는 화소의 전체수를 n_i 라 하고 영상의 밝기 값 범위는 0부터 $M-1$ 까지의 밝기 값 레벨을 갖는다고 가정했을 때 해당 영상의 히스토그램 (H_i)은 다음 식과 같다.

$$H_i = \frac{n_i}{n_t} \text{ for } i = 0 \cdots M-1 \quad (3.3)$$

(3.3)에 의해 정의된 히스토그램의 특성은 다음과 같다. 첫 번째 특성으로는 각 H_i 는 해당 영상에서 i 번째 밝기 값의 확률분포 $prob(G_i)$ 를 제공하며, 이때 히스토그램의 전체 합은 다음과 같이 1이 된다.

$$\sum_{i=0}^{M-1} H_i = 1 \quad (3.4)$$

히스토그램의 두 번째 특성은 j 번째 밝기 값보다 작거나 같은 밝기 값 j 의 확률분포는 다음과 같이 표현되며 이를 누적 확률분포 (cumulative histogram)라고 부른다.

$$prob(G_i \leq VG_j) = \sum_{i=0}^j H_j \quad 0 \leq j \leq M \quad (3.5)$$

3.3.3 임계치

영상처리 응용분야 가운데 영상분할 (segmentation)은 영상의 특정 밝기 값을 지닌 부분을 특정 영역으로 분리시키는 작업이다. 즉, 영상 내의 물체는 흰색 (검정색)으로 동시에 배경은 검정색 (흰색)으로 표현하는 것이 대표적인 경우이다. 일반적으로 영상이 배경과 물체로 구성된 경우 영상의 히스토그램은 Fig. 3.9와 같이 이중모달 (bimodal) 형태로 나타난다.

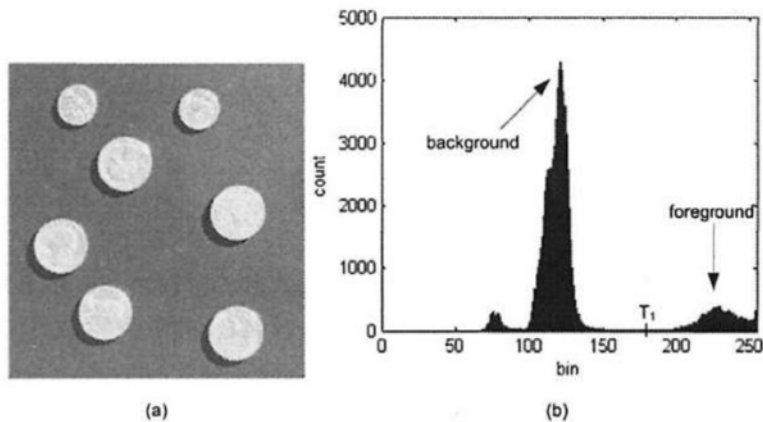


Fig. 3.9 Bimodal Histogram of an Image

Fig. 3.9에서 히스토그램의 정점 (peak)는 영상 내의 물체와 관련되고 정점의 높이는 물체의 크기와 관련된다. 임계치 (threshold)는 배경과 물체를 효과적으로 분리할 수 있는 경계 값을 의미하며, 임계치의 설정 값에 따라 영상 분할의 결과가 달라지기 때문에 적절한 임계치의 설정이 매우 중요하다. 일반적으로 임계치를 설정하는 방법은 해당 영상 (I)의 통계적 측정치인 영상의 평균값과 표준편차 (σ)에 의해서 결정되며, 식은 다음과 같이 정의된다.

$$T = \text{mean}[I(x,y)] + \beta \times \sigma [I(x,y)] \quad (3.6)$$

이처럼 임계치가 설정된 후 영상의 분할은 임계치보다 작은 입력영상의 밝기 값에는 0을 그리고 임계치보다 큰 밝기 값에는 다른 값을 할당한다면 두 영역으로 분할된 이진영상을 출력영상으로 획득할 수 있다. 출력영상의 밝기 값을 R_i 이라고 할 때 임계치 T 의 적용식은 다음과 같다.

$$R_i = \begin{cases} H, I_i \geq T \\ L, I_i < T \end{cases} \quad (3.7)$$

그러나 일반적으로 입력 영상은 단순히 배경과 물체로만 구성되어 있지 않으며, 히스토그램이 이중모달이 아닌 다중모달 (multimodal)인 경우 영상 분할의 오류가 발생할 수 있다. 이러한 경우 임계치 T 의 설정은 전체 영상의 부분 영상들 I_R 에 대하여 각 영역 별 임계치를 다음과 같이 설정한다. 이는 영상의 부분 영역이 이중모달의 특성을 지닌다는 가정 하에서 실행된다.

$$T = \text{mean}[I_R(x,y)] + \beta \times \sigma [I_R(x,y)] \quad (3.8)$$

임계치의 설정은 영상의 전체 밝기 값 범위에 적용되는 것이 일반적이나 경

우에 따라서는 영상의 밝기 값 영역 가운데 일부분에 적용될 수도 있다. 이 경우 임계치 값이 적용되지 않는 부분은 원 영상의 밝기 값이 그대로 유지되도록 한다. 예를 들어 임계치(T)가 적용되는 밝기 값의 범위를 $S \leq T \leq U$ 라고 하고 적용 범위의 하한 값을 S , 상한 값을 U , 그리고 이 범위 밖의 밝기 값은 원영상 그대로 유지한다고 할 경우 임계치 적용 식은 다음과 같다.

$$R_i = \begin{cases} I_i, & I_i > U \\ H, & U \geq I_i \geq T \\ L, & S \leq I_i \leq T \\ I_i, & I_i < S \end{cases} \quad (3.9)$$

3.3.4 이진 영상 변환

이진 영상은 0과 1의 값만을 가진 2레벨 영상을 의미한다. 디지털 영상 처리 분야에서 처리 속도 및 단순 처리 결과가 중요한 영상 분야에서 이진 영상 처리가 사용된다. 이는 실용적인 시스템에서 처리의 고속성, 저비용이 요구되는 경우 정보량이 많은 컬러, 명암도 영상을 가지고 처리하는 것이 항상 좋은 방법은 아니기 때문이다. 이진 영상 처리는 영상 분석 (image analysis) 분야에서는 필수적인 전처리 과정으로 자리잡고 있다. 이진 영상은 배경과 객체의 간단한 분리, 영상의 전체적인 정보의 간략화 등 다양한 목적으로 사용된다. 아래와 같은 과정을 통해 256 레벨을 가진 명암도 영상을 2 레벨의 이진 영상으로 처리 가능하다.

$$Binaryimage[x][y] = \begin{cases} 1 \text{ if } Grayimage[x][y] \geq threshold \\ 0 \text{ else } Grayimage[x][y] < threshold \end{cases} \quad (3.10)$$

이진 영상인 *Binaryimage* 중에서 1의 부분은 흰색으로써 대상 객체를 표시하고, 0의 부분은 검정색으로써 배경을 표시하는 것이 일반적이다. 이 때 영

상 내 특징을 고려하여 객체와 배경을 확실하게 구분할 수 있도록 임계치를 설정하는 알고리즘을 신중히 고려하여야 한다. 임계치 설정과 관련한 이진 영상 생성 알고리즘은 다음과 같은 방법이 있다.

- 첫째, 히스토그램의 분포를 파악하여 적합한 임계치를 설정
- 둘째, 블록 이진화 기법의 적용
- 셋째, 이중 임계치 (double thresholding) 설정
- 넷째, 난수 적용
- 다섯째, 적응적 임계치 (adaptive thresholding) 설정
- 여섯째, 보간적 임계치 (iterative thresholding) 설정

지능적으로 임계치를 설정 가능한 것이 최선이나 실제로는 영상의 특징 고려와 수많은 시행착오를 거쳐 결정하는 것이 대부분이며 또한 컬러 영상이나 명암도 영상의 이진 영상 변환 시 원 영상의 상당 부분의 손실 가능성을 염두해 두어야 한다. 임계치에 따라 변환된 이진 영상의 예는 Fig. 3.10과 같다.



Fig. 3.10 Example of Binarization

제 4 장 재료 및 방법

본 연구에서는 입자의 크기 및 형상에 따른 정수중의 침강속도에 대한 분석을 위해 실측 및 디지털 이미지 해석기법을 적용하여 형상정보를 획득하였으며, 또한 침강실험 중 획득한 디지털 이미지를 통해 침강 궤적 및 침강 속도를 산정하였다. 전체적인 실험과정을 요약하면 Fig. 4.1과 같다.

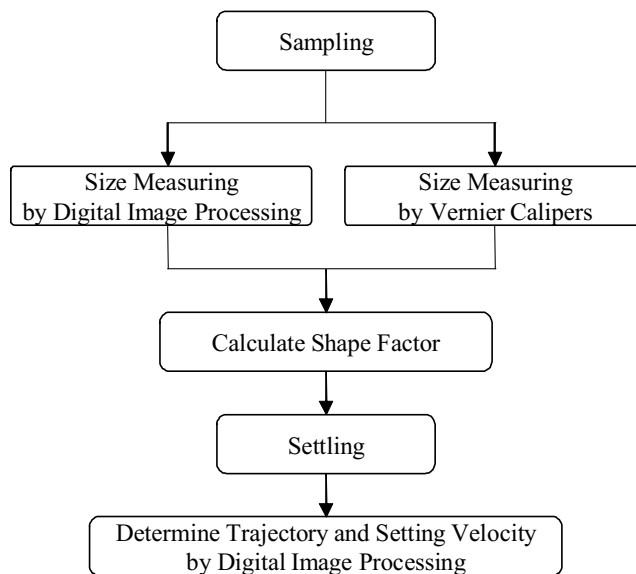


Fig. 4.1 Test Procedure

4.1 실험재료

본 연구에서는 입자의 크기 및 형상에 따른 정수중의 침강속도에 대한 분석을 수행하였다. 이를 위해 일반적으로 매립재로 주로 사용되는 화강풍화토를 이용하여 실험을 수행하였으며 또한 실험결과의 검증을 위해 타 지역의 화강풍화토에 대하여 검증시험을 수행하였다. 형상 측정 및 침강실험 수행에 앞

서 입자에 부착된 세립분을 제거하기 위해 수세법을 통해 입자를 분류하였다. 형상 측정 및 침강실험에 사용된 입자의 직경은 1mm에서 10mm사이에 분포한다. 실험에 사용된 화강풍화토 원 시료 및 검증시험에 사용된 시료의 입도분포 및 물리적 특성은 Fig. 4.2, Table 4.1과 같다.

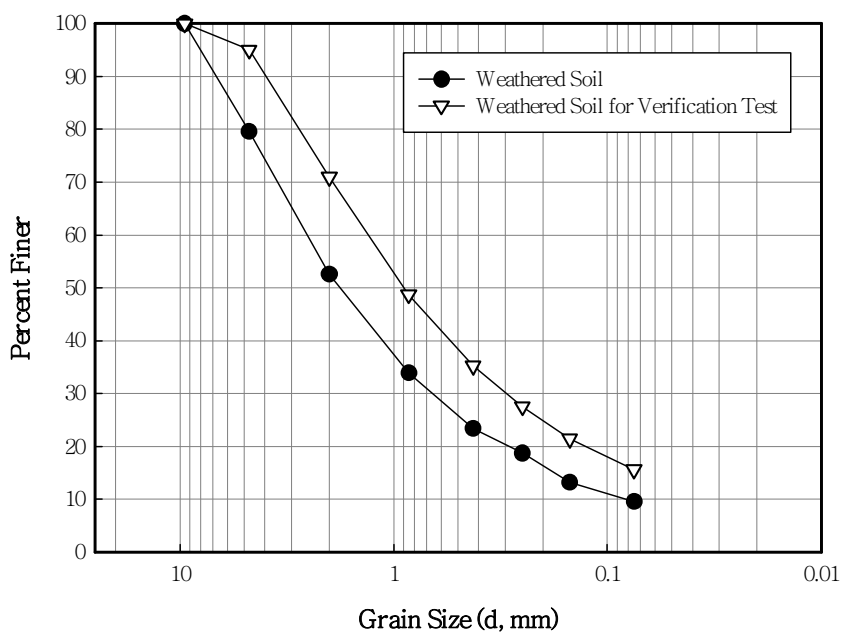


Fig. 4.2 Grain Size Distribution of Weathered Soil

Table 4.1 Physical Properties of Weathered Soil

	G_s	Grain Size Distribution (%), Finer than		LL	PL
		4.75mm	0.075mm		
Weathered Soil	2.60	79.58	9.58	N.P	N.P
Weathered Soil for Verification Test	2.67	95.00	15.66	N.P	N.P

4.2 실험방법

4.2.1 디지털 이미지의 획득

디지털 이미지 획득을 위한 디지털 카메라로 4272×2848의 해상도를 가지는 Canon社의 EOS-100d를 이용하였다. 디지털 이미지 해석을 통한 분석 작업에서는 정확한 이미지의 획득이 매우 중요하다. 먼저, 디지털 이미지 처리 단계에서 배경과 입자의 확실한 구분을 위해 입자의 원색과 확연하게 차이가 나타나는 배경을 선택하여야 한다. 또한 촬영 시 카메라와 대상의 촬영 각도에 따른 왜곡이 발생하지 않도록 하여야 하며 조명에 따른 이미지의 차이가 나타나지 않도록 하여야 한다. 본 연구에서는 밝은 색상인 화강풍화토와 확연하게 차이가 나타나는 균일한 검은색상의 배경을 이용하였으며 직각자를 이용하여 촬영 평면과 카메라의 촬영 각도를 수직으로 유지하였다. 또한 LED 조명을 이용하여 균일한 조명 조건에서 촬영을 수행하였으며 초점거리에 의해 발생하는 이미지의 왜곡을 줄이기 위해 가장자리를 제외한 중앙에서 획득한 이미지를 이용하여 분석하였다. 본 연구에서 디지털 이미지 획득을 위한 실험장치의 모습은 Fig. 4.3과 같다.



Fig. 4.3 Apparatus for Aquisition of Digital Image

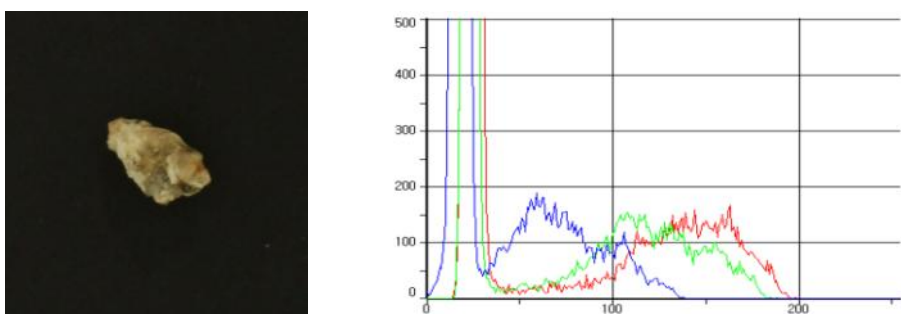
4.2.2 입자 형상 특성 추출

입자의 형상 특성 추출을 위해 Fig. 4.4 과 같이 각 입자의 이미지를 획득한 후, Media Cybernetics社의 이미지 분석 소프트웨어 Image-Pro Plus Version 6.0을 이용하여 영상의 처리 및 분석을 수행하였다. 형상 분석을 위해 획득한 이미지의 해상도는 0.077mm/pixel이다. 획득한 원본 이미지는 적색, 녹색, 청색의 조합으로 색상을 표현하는 RGB 이미지이며 이는 각 색상별로 상이한 히스토그램을 가지기 때문에 색상정보를 활용한 분석에는 용이하나 형상과 같은 정보를 추출하는데 불필요한 정보를 포함하고 있다. 따라서 원 이미지를 gray scale이미지로 변환하여 이진 영상 처리를 수행하였다. gray scale로 변환된 이미지는 이미지로부터 원하는 정보를 추출하기 위해 이진영상처리

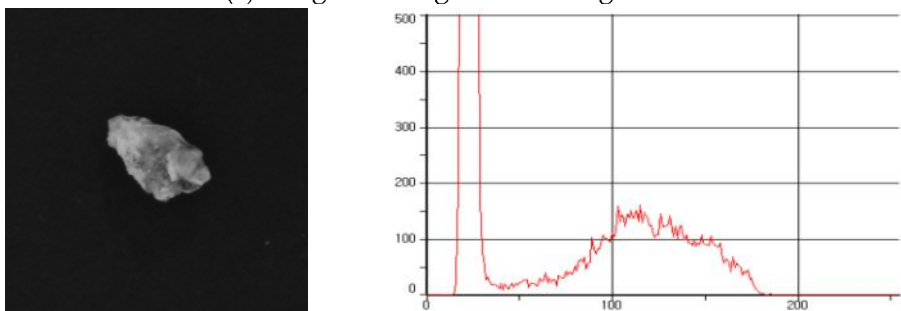
(binarization)를 수행하여야 한다. 이를 위해 적절한 임계치 (threshold)를 결정해야 하며 이는 gray scale로 변환된 이미지의 히스토그램을 이용하여 결정한다. Fig. 4.5 (b)의 히스토그램에서 2개의 정점 (peak)가 나타나는데, 왼쪽이 이미지의 배경부분이며 오른쪽이 입자 부분이다. 두 정점 사이의 적절한 밝기값을 임계치로 설정하여 이진 영상 처리를 수행 가능하다. 본 연구에서는 이진 영상 처리를 위해 30을 임계치로 설정하였으며, 이진 영상 처리 단계를 거친 이진 영상은 Fig. 4.5 (c)와 같다. 이진 영상 처리를 거친 입자 이미지에 대해 Image-Pro Plus Version 6.0를 이용하여 Fig. 4.6과 같은 입자의 면적, 둘레, 직경, 원마도, 종횡비 등의 형상 정보를 추출하였다.



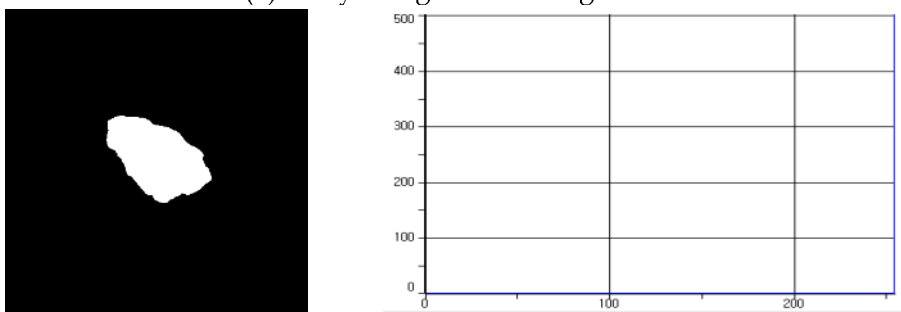
Fig. 4.4 Procedure of Acquisition of Shape Factor



(a) Original image and histogram

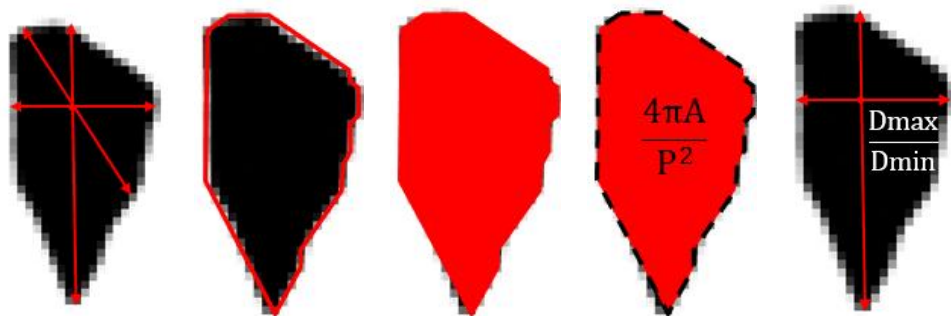


(b) Gray image and histogram



(c) Binary image and histogram

Fig. 4.5 Procedure of Binarization



(a) Diameter (b) Perimeter (c) Area (d) Roundness (e) Aspect Ratio

Fig. 4.6 Shape Properties of Particle by Digital Image Processing

4.2.3 침강계적 및 침강속도 산정

본 연구에서는 입자의 침강시험을 위해 Fig. 4.7과 같은 높이 1000mm, 폭 300mm, 깊이 80mm인 직사각형 형태의 아크릴 재질 수조를 이용하였다. 침강은 정수 상태에서 이루어졌으며 입자 별로 독립적으로 실험을 수행하였다. 침강시험용 수조의 전면에 디지털 카메라를 설치하였으며 촬영면과 카메라의 방향이 수직을 이루도록 하였다. 수조가 세로로 긴 형태이기 때문에 디지털 카메라를 90°회전하여 수조 전체가 디지털 이미지에 나타날 수 있도록 하였다. 디지털 이미지에서 입자와 배경을 확연하게 구분 가능하도록 배경이 되는 수조의 뒷부분은 검은색으로 하였으며 이미지의 왜곡에 의한 오차를 최소화하기 위해 수조의 상부 100mm, 하부 100mm를 제외한 800mm구간에서 침강계적을 산정하였다. 또한 초기 침강 시 표면장력의 영향을 최소화 할 수 있도록 수면 바로 아래에서 핀셋을 이용하여 입자를 침강시켰다.



Fig. 4.7 Apparatus for Settling Test

본 연구에서 이용한 디지털 카메라인 Canon社의 EOS-100d는 최대 연속 촬영 속도가 초당 4매이기 때문에 연속 촬영으로 이미지를 획득 시 입자의 개략적인 침강속도의 산정은 가능하나 세부적인 거동을 관측하기에는 어려움이 있다. 이에 따라 입자 침강 시 해상도 1280×1920의 HD동영상을 촬영하여 디지털 이미지를 획득하였다. 동영상은 연속적인 디지털 이미지의 집합이며, 따라서 동영상을 분할하면 디지털 이미지를 획득 할 수 있다. 본 연구에서 촬영한 동영상은 초당 25프레임이며 이에 따라 1280×1920해상도를 가지는 디지털 이미지를 초당 25장 획득하였다. 입자의 침강 시 획득한 프레임 별 디지털 이미지의 예시는 Fig. 4.8과 같다.



Fig. 4.8 Divided Images by Frame

획득한 이미지는 오픈소스 언어인 R을 이용하여 Fig. 4.9와 같이 영상의 이진화를 수행하였다. 먼저 획득한 원본 이미지의 상, 하, 좌, 우에 불필요한 부분을 잘라내어 해석에 불필요한 부분을 제거하였으며 이후 gray scale화 및 이진화를 수행하였다. 또한 필터를 이용하여 동영상 촬영 시 외부의 조명 등에 의해 이미지에 나타나는 노이즈를 제거하여 침강 입자만을 포함한 이진 영상을 획득하였으며 이후 각 이미지에서 침강 입자의 면적중심을 픽셀좌표로 획득하였다. 이와 같은 과정을 전체 이미지 프레임에 대해 수행하면 Fig. 4.10과 같이 각 프레임 별로 침강 입자의 위치를 산정 할 수 있다.

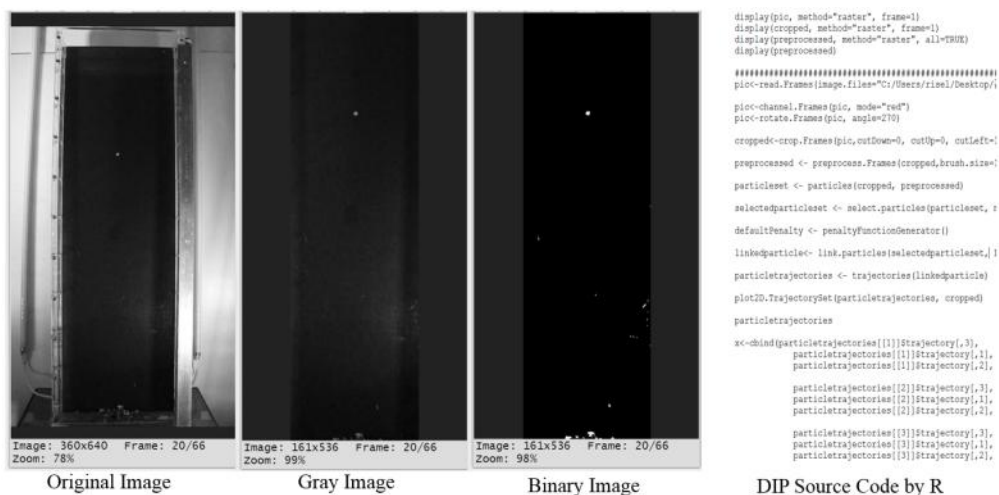


Fig. 4.9 Procedure of Binarization by R

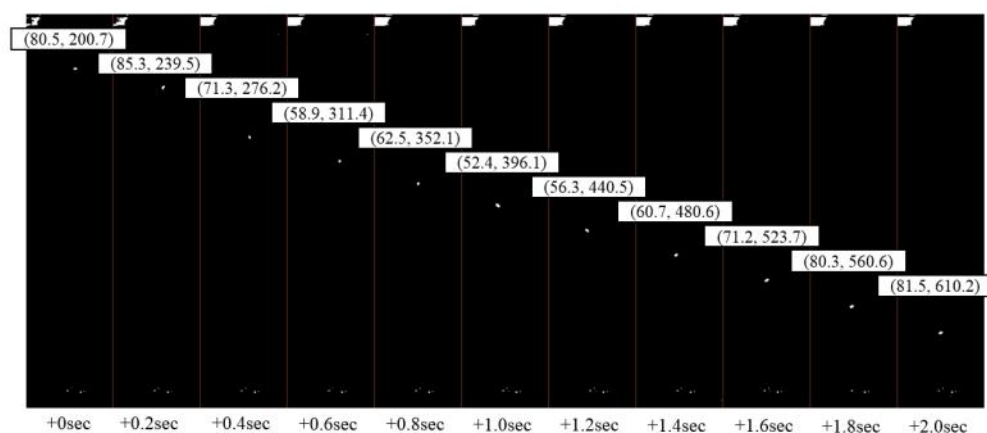


Fig. 4.10 Position of Particles by Frame

각 프레임별로 획득한 침강 입자의 위치를 이용하면 Fig. 4.11과 같이 입자의 침강궤적 및 침강속도를 산정 할 수 있다. 입자의 침강 궤적은 각 프레임별로 획득한 침강 입자 위치의 집합으로 나타나며 침강 궤적에서 입자의 침강 시 좌·우 방향 유동량을 정량적으로 산정 가능하다. 입자의 침강속도는 입자의 변위와 시간을 통해서 산정 가능한데, 이때 변위는 이미지 프레임 간 입자의 위치좌표의 차이로 나타나며 시간은 이미지 프레임 간의 간격인 1/25초이다.

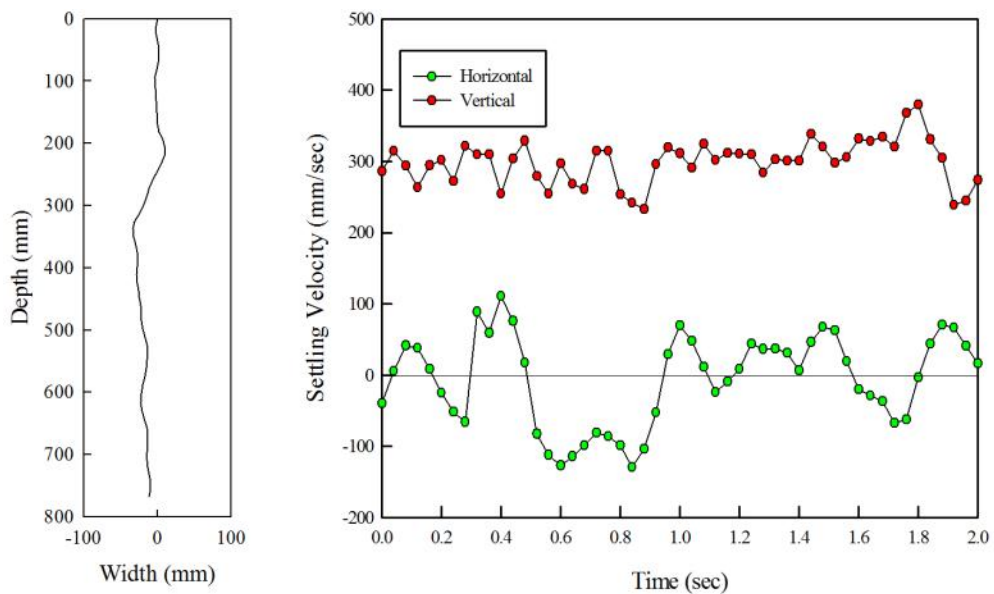


Fig. 4.11 Trajectory and Settling Velocity of Particle

제 5 장 결과 및 고찰

5.1 매립 토사의 형상 특성

5.1.1 형상분류표를 이용한 매립 토사의 형상 분류

본 논문에서 사용한 매립 토사의 형상분류를 수행하기 위해 각 입자의 장축, 중간축, 단축을 버니어 캘리퍼스를 이용하여 실측하였으며 이를 Lee et al (1983)이 제안한 형상분류표에 따라 분류하였다. Fig. 5.1과 같이 매립 토사는 sphere, short rod, thick plate, ellipsoid의 4종의 형태로 분류되었으며 이는 장축과 중간축, 단축의 비가 각각 1 : 1 : 1 (sphere), 2 : 1 : 1 (short rod), 2 : 2 : 1 (thick plate), 4 : 2 : 1 (ellipsoid)임을 의미한다. plate나 blade 또는 needle의 형상은 1 : 1 : 0 (plate), 2 : 1 : 0 (elliptical plate), ∞ : 1 : 0 (blade), ∞ : 2 : 1 (thick blade), 1 : 0 : 0 (needle)으로 장축이 매우 크거나 단축이 매우 작은 극단적인 형태이다. 이는 자연에 존재하는 조립토의 형상을 고려해 보았을 때 실제 존재하기 어렵기 때문에 본 연구에서 사용한 매립 토사는 자연에 존재하는 조립토의 형상을 대부분 고려하였다고 할 수 있다.

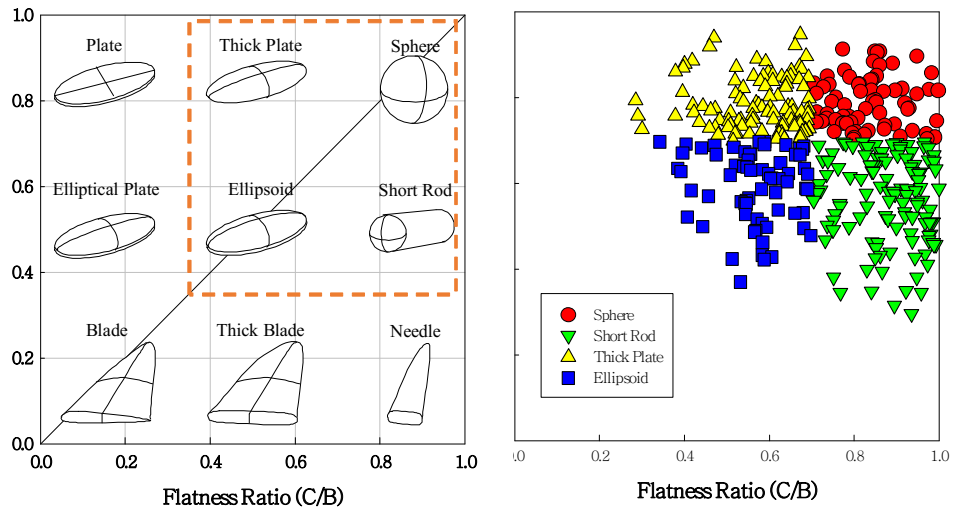


Fig. 5.1 Shape of Landfill Soil

5.1.2 DIP를 통해 측정된 매립 토사의 형상 특성

본 연구에서는 343개의 매립 토사 입자에 대하여 디지털 이미지 해석기법을 이용하여 형상정보를 추출하였다. 이에 앞서, 디지털 이미지 해석기법을 이용한 형상 측정 기법을 정확도를 평가하기 위해 입자크기의 실측치와 비교 및 오차율 산정을 수행하였다. 정확도 평가에 사용된 시료는 동전 2종, 플라스틱 구형 입자 및 실제 토립자 4종이다. 검정에 이용된 입자의 원본 디지털 이미지 및 이진영상 변환 결과는 Fig. 5.2와 같다. 실측 및 디지털 이미지 해석기법을 통한 측정결과와 오차는 Table 5.1과 같다. 오차율은 최대 3%내외로 나타났으며 이에 따라 디지털 이미지 해석기법을 통한 입자의 형상 측정의 정확도는 매우 높은 것으로 판단된다.



(a) Original Image for Verification of Measuring by DIP



(b) Binary Image for Verification of Measuring by DIP

Fig. 5.2 Image for Verification of Measuring by DIP

Table 5.1 Error of Measuring by Digital Image Processing

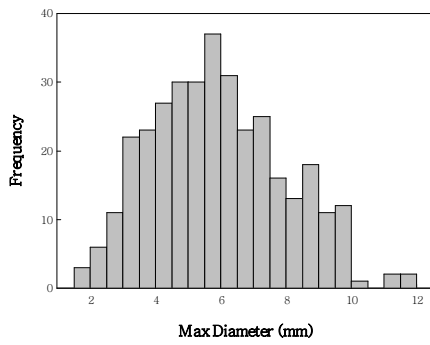
Particle	Measured by Vernier Calipers (mm)		Measured by DIP (mm)		Error (%)	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Coin 1	26.50	26.50	26.90	26.41	-1.5	0.3
Coin 2	24.00	24.00	24.06	23.63	-0.3	1.6
Sphere	6.00	6.00	6.10	5.94	-1.6	1.0
Soil 1	5.05	3.25	5.09	3.29	-0.9	-1.1
Soil 2	6.70	4.20	6.75	4.18	-0.8	0.5
Soil 3	6.55	4.05	6.59	4.01	-0.7	1.0
Soil 4	6.05	4.80	6.15	4.93	-1.7	-2.7

디지털 이미지 해석기법을 이용하여 매립 토사 입자 343개에 대해 최대직경, 평균직경, 최소직경, 면적, 둘레, 원마도, 종횡비 등의 형상 정보를 추출하였으며 추출한 형상 정보의 통계적 특성은 Table 5.2와 같다.

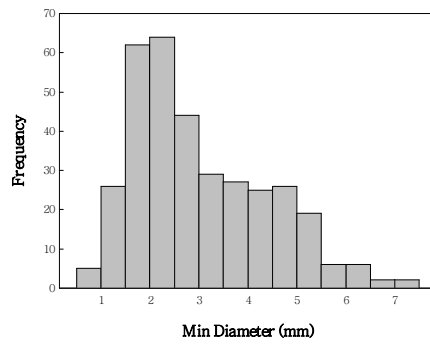
Table 5.2 Statistic Properties of Shape Properties

	Max	Mean	Min	Standard Deviation
Diameter (max)	11.79	5.92	1.60	2.03
Diameter (min)	7.49	2.97	0.80	1.36
Diameter (mean)	8.41	4.61	1.33	1.57
Area	58.52	19.49	1.57	12.86
Perimeter	37.08	17.22	4.43	6.18
Roundness	0.90	0.72	0.20	0.13
Aspect Ratio	4.70	2.23	1.18	0.67

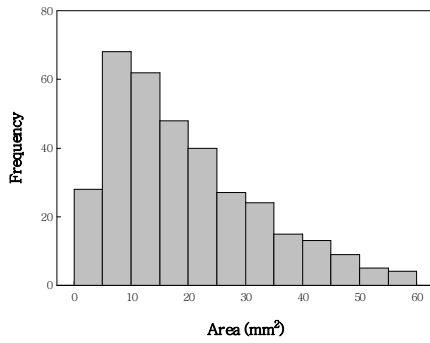
평균직경은 최대 8.41mm, 최소 1.33mm, 평균 4.61mm, 표준편차 1.57로 나타났다. 최대직경과 최소직경은 각각 Fig. 5.3 (a), (b)와 같이 평균 5.92mm, 3.54mm로 나타났으며 평균직경과 유사한 분포를 보였다. 입자의 면적은 Fig. 5.3 (c)와 같이 분포하며 평균은 19.49mm²이다. 입자의 면적은 Fig. 5.4 (c)와 같이 평균직경의 제곱에 비례하여 증가하였으며 매우 높은 상관성을 나타낸다. 입자의 둘레는 평균 17.22mm이며 평균직경과 유사한 분포를 보인다. 또한 입자의 둘레는 Fig. 5.3 (d)와 같이 대부분 평균직경에 비례하여 선형적으로 나타나나 일부 입자의 경우 평균직경에 비해 둘레가 매우 크게 나타났다. 입자의 원마도 (roundness)는 Fig. 5.3 (e)와 같이 분포하고 평균 0.72, 표준편차 0.13이며 대부분의 입자는 크게 모나지 않은 형태인 Well-rounded로 분류된다. 또한 Fig. 5.4 (e)에서 확인할 수 있듯이 평균직경에 따른 원마도의 차이는 크지 않았다. 입자의 종횡비 (aspect ratio)는 Fig. 5.3 (f)와 같이 분포하고 평균 2.24, 표준편차 0.67로 나타났으며 이는 매립 토사 입자가 원형이 아니라 세로로 긴 형상을 가지고 있음을 의미한다. Fig. 5.4 (f)와 같이 입경에 따라 종횡비의 차이는 크지 않으나 종횡비가 큰 경우 즉, 입자가 세로로 매우 긴 형태인 경우는 대부분 3~5mm의 중간 입경에서 관찰되었다.



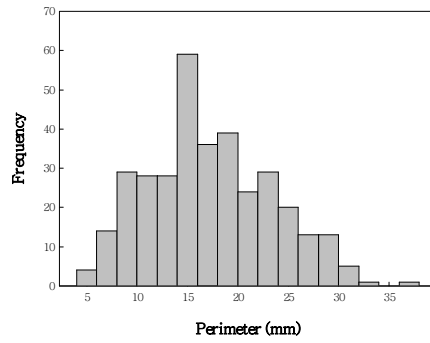
(a) Diameter (max)



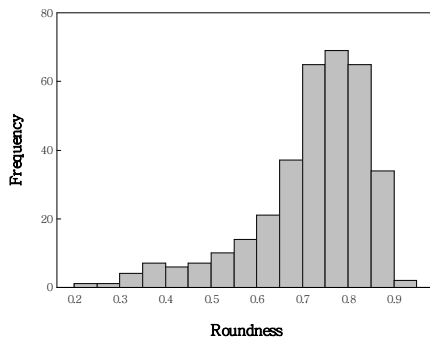
(b) Diameter (min)



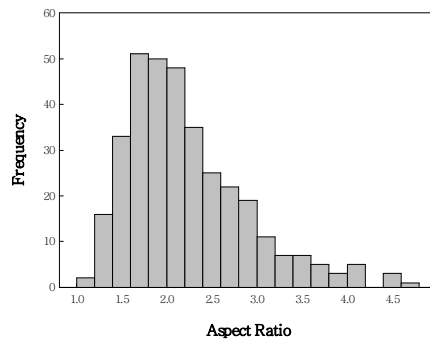
(c) Area



(d) Perimeter

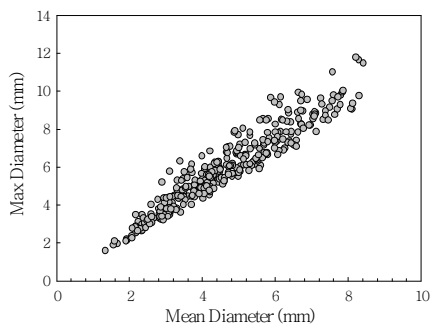


(e) Roundness

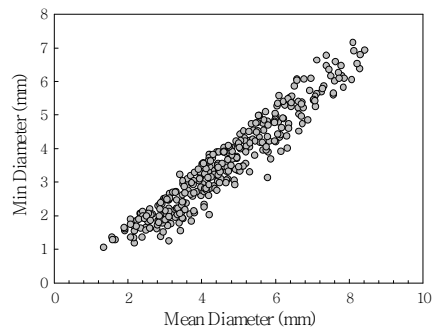


(f) Aspect Ratio

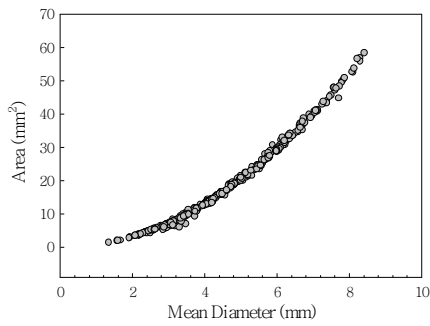
Fig. 5.3 Histogram of Shape Properties of Landfill Soil



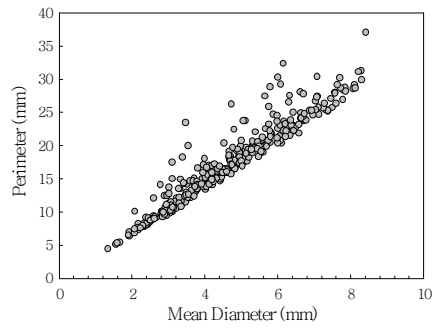
(a) Diameter (max)



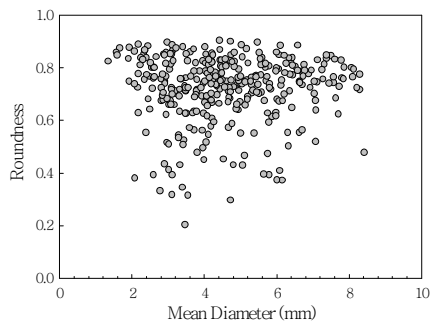
(b) Diameter (min)



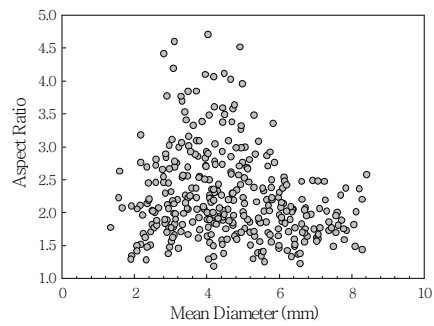
(c) Area



(d) Perimeter



(e) Roundness



(f) Aspect Ratio

Fig. 5.4 Shape Properties Compared with Mean Diameter of Landfill Soil

5.2 매립 토사의 침강거동

5.2.1 매립 토사의 침강궤적

본 연구에서는 디지털 이미지 해석 기법을 적용하여 매립 토사의 침강궤적을 산정을 실시하였으며 실험을 수행한 343개 입자의 침강궤적은 Fig 5.5와 같다. DIP기법을 적용하여 개별 입자의 침강궤적을 정량적으로 획득하였으며 궤적에 나타난 위치정보를 통해 입자의 수평방향 이동량을 확인 가능하다.

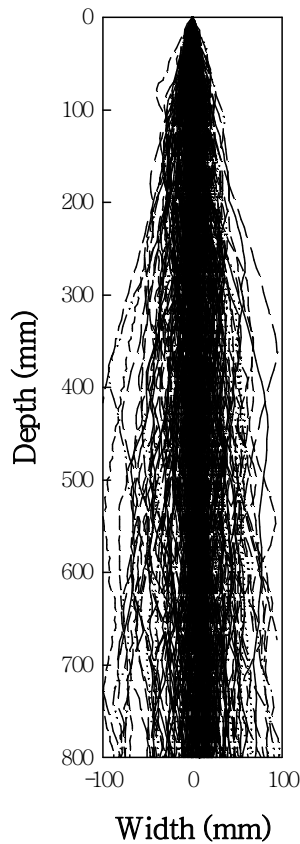


Fig. 5.5 Settling Trajectory of Landfill Soil (overall)

매립 토사는 정수상태에서도 그 크기와 형상에 따라 불규칙하게 좌·우 방향으로 유동하며 침강하며 그 궤적은 Fig 5.5와 같이 매우 다양하게 나타난다. Fig 5.6의 6개 샘플을 보면 좌·우 방향으로 작게 유동하거나 한쪽 방향으로 치우쳐서 흐르는 등의 거동을 보인다. 입자의 수평방향 이동량의 분포는 Fig 5.7과 같다. 대부분의 입자는 800mm침강 중 10mm이내의 수평변위를 보였으며 평균 12.37mm, 최대 75.84mm로 나타났다.

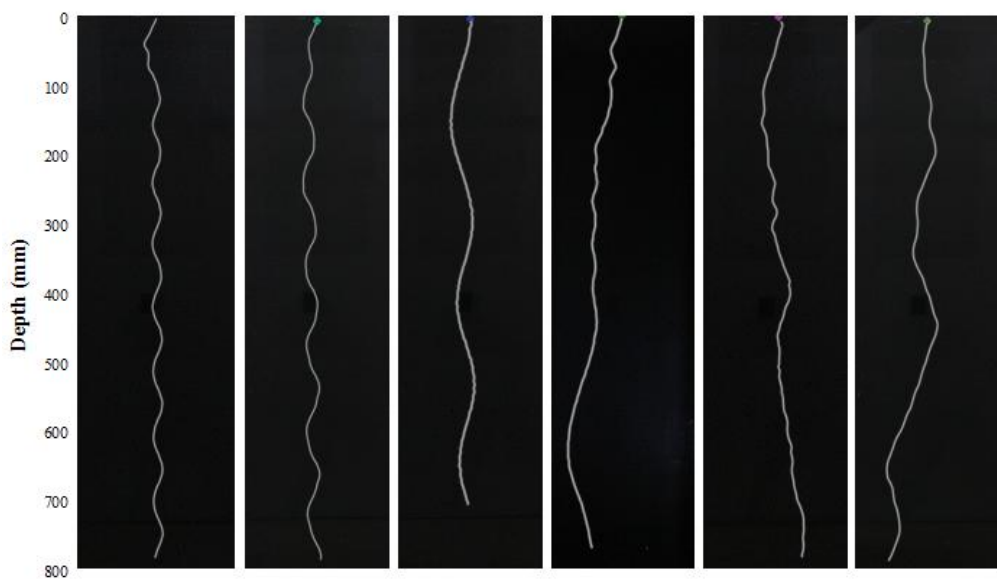


Fig. 5.6 Settling Trajectory of Landfill Soil (6 samples)

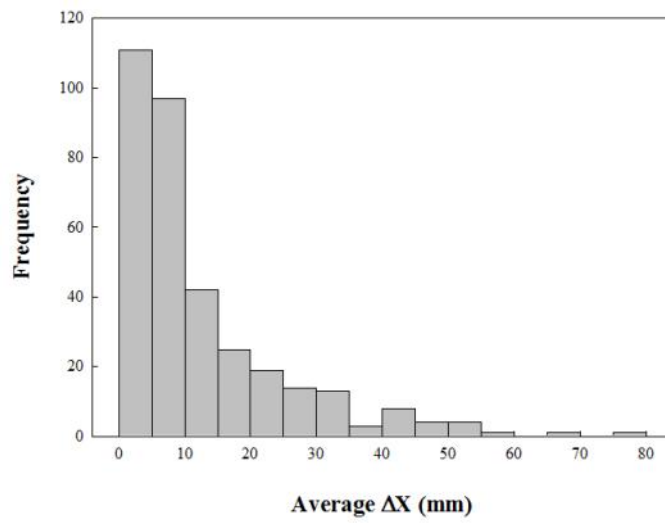


Fig. 5.7 Histogram of Averaged Horizontal Distance

입자의 크기에 따른 수평방향 거동을 분석하기 위해 전체 입자를 직경에 따라 12개로 구분하여 평균적인 수평방향 이동량을 파악하였으며 이는 Fig. 5.8과 같다. 정적인 상태에서 침강궤적은 다양하게 나타나나 전체적으로 보았을 때 입자의 직경에 따라 수평방향 이동량이 다소 증가하는 경향을 나타내었다.

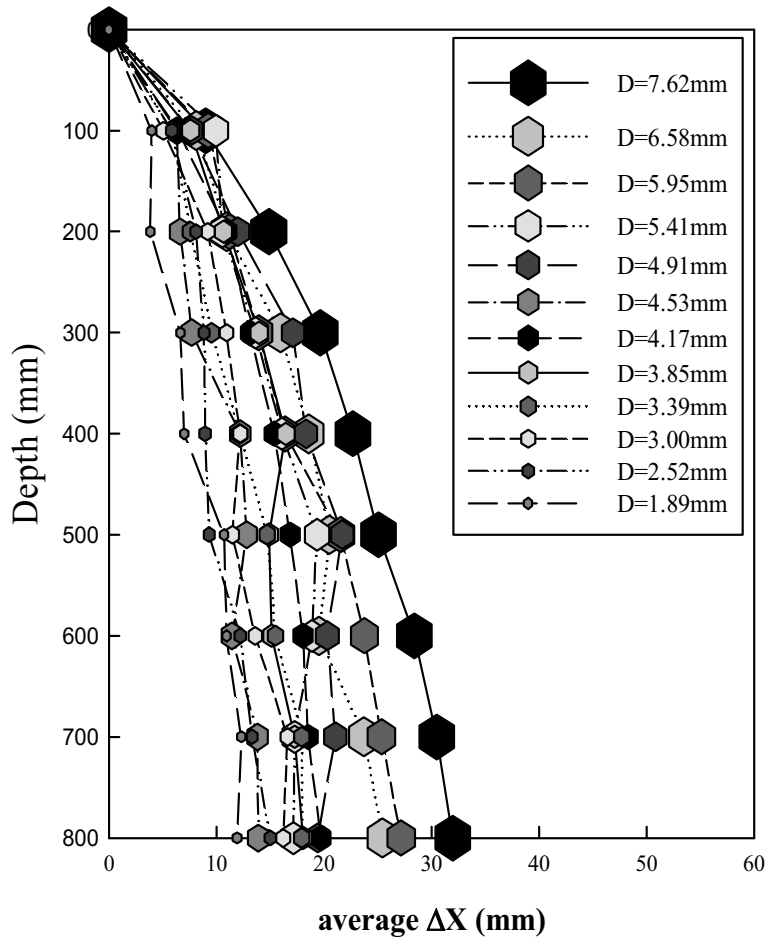


Fig. 5.8 Increase in Averaged Horizontal Distance through Particle Diameter

5.2.2 매립 토사의 침강속도

매립 토사의 침강속도는 기존 연구자들이 제시한 침강속도 산정식의 결과와 유사한 범위로 나타났으며 기존 연구 결과 중 Gravel 및 Sand에 대해서 침강속도 산정식을 제시한 Rubey (1933)의 결과와 가장 유사하였다. 이는 본 연구에 사용된 토사의 직경이 1mm ~ 10mm로 통일분류법상 자갈 혹은 모래로 분류되기 때문으로 판단된다. 침강속도는 평균직경이 증가함에 따라 점차 증가하는 경향을 보이거나 평균직경이 같은 입자임에도 불구하고 침강속도에 차이가 다소 존재한다.

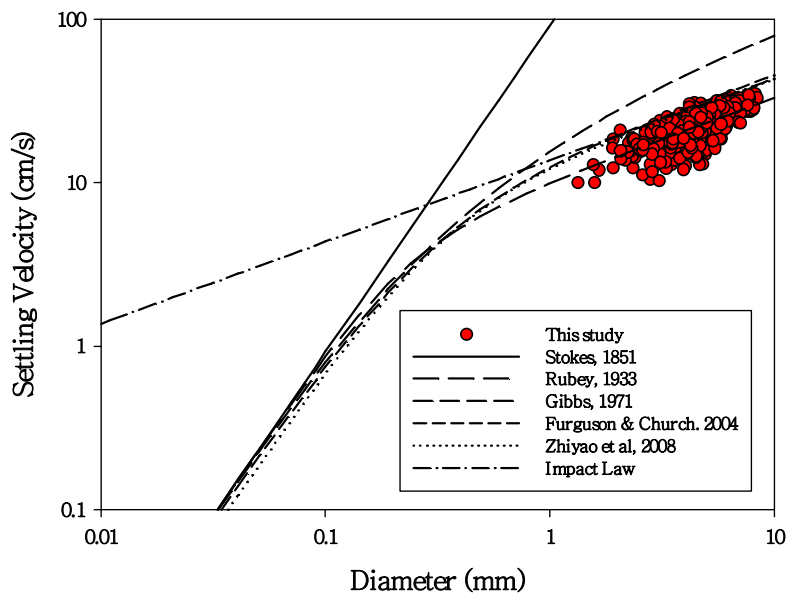


Fig. 5.9 Settling Velocity of Landfill Soil

5.3 형상 특성에 따른 침강거동

5.3.1 형상분류에 따른 침강속도

입자의 형상에 따른 침강속도의 차이를 분석하기 위해 직경에 따른 침강속도 측정결과를 기존 형상분류표에 따라 분류하였으며 이는 Fig. 5.10과 같다. 분류 결과 sphere 형상 입자들의 침강속도가 thick plate, short rod, ellipsoid 형태의 입자들에 비해 크게 나타났으며 이는 입자의 형태가 구형이 아닌 경우 같은 평균직경을 가지더라도 침강속도가 작게 나타남을 의미한다. 6mm이하의 입자의 경우 입자의 형상에 따른 침강속도의 차이가 크게 나타났으며 6mm이상인 경우 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 이처럼 6mm이하 입자의 침강속도는 입자의 형상에 따라 차이가 존재하기 때문에 침강속도 산정 시 입자의 직경뿐만 아니라 형상에 대한 고려가 반드시 필요하다. 형상분류표에 따른 입자의 분류는 입자의 형상에 따른 침강속도의 차이를 잘 설명하나 이를 적용하기 위해서는 단일 입자에 대해 장축, 중간축, 단축의 길이를 모두 측정하여야하기 때문에 다수의 입자에 대해 적용성이 떨어지는 한계가 존재한다.

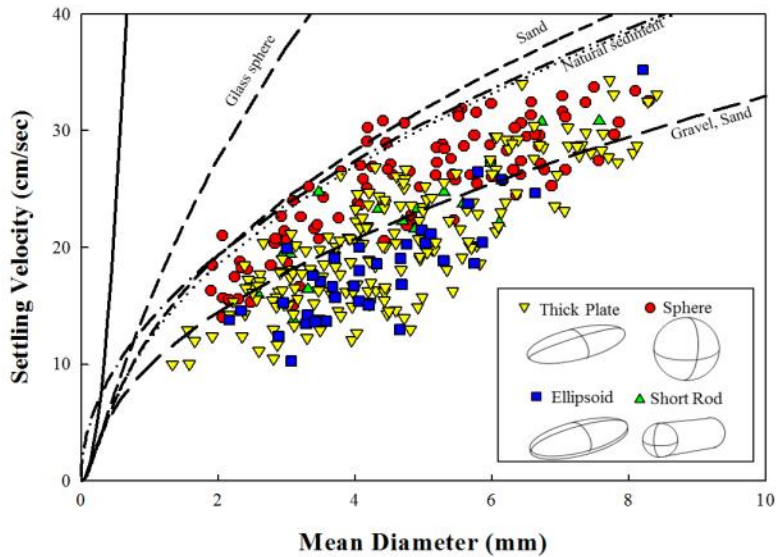


Fig. 5.10 Settling Velocity of Landfill Soil Classified with Particle Shape

5.3.2 DIP를 통해 측정된 형상 특성에 따른 침강속도

DIP를 통해 측정 가능한 형상 특성 인자를 통해 입자의 형상에 따른 침강속도의 차이를 분석하였다. 입자의 직경에 따른 침강속도는 Fig. 5.11과 같다. 침강속도는 입자의 직경과 관계가 있기 때문에 형상에 따른 침강속도의 변화를 분석하기 위해서는 입자의 직경에 따른 영향을 배제하여야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 직경에 따른 침강속도 회귀식과 침강속도 산정 결과의 편차를 산정하여 이와 형상 특성과의 상관관계를 분석하였다. 직경과 편차와의 관계는 Fig 5.12와 같으며, 편차는 최대 +54%, 최소 -43%의 변동폭을 나타냈다. 편차와 형상 특성과의 상관관계를 분석하기 위해 다양한 형상 특성 인자들과의 관계를 도시하였으며 이는 Fig. 5.13~24와 같다. 형상 특정 인자 중 종횡비가 증가함에 따라 편차가 감소하는 경향을 Fig. 5.14를 통해 확인 가능하다. 편차와 형상 특성과의 상관관계 분석 결과 DIP를 통해 산정한 다양한 형상 인자 중 종횡비가 가장 상관성이 높았으며 상관계수는 -0.72로 나타났다.

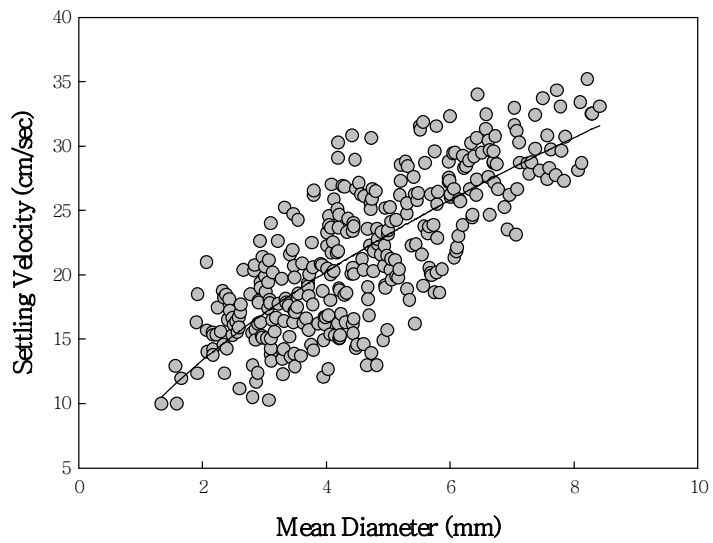


Fig. 5.11 Settling Velocity and Regression Line by Mean Diameter

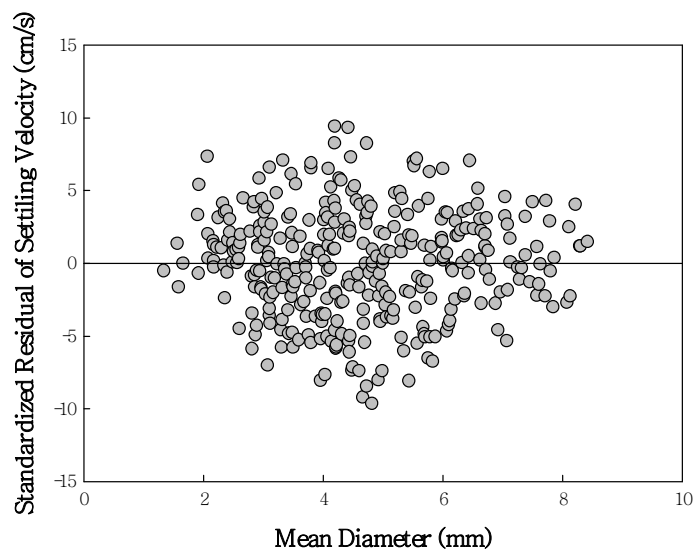


Fig. 5.12 Standardized Residual of Settling Velocity versus Mean Diameter

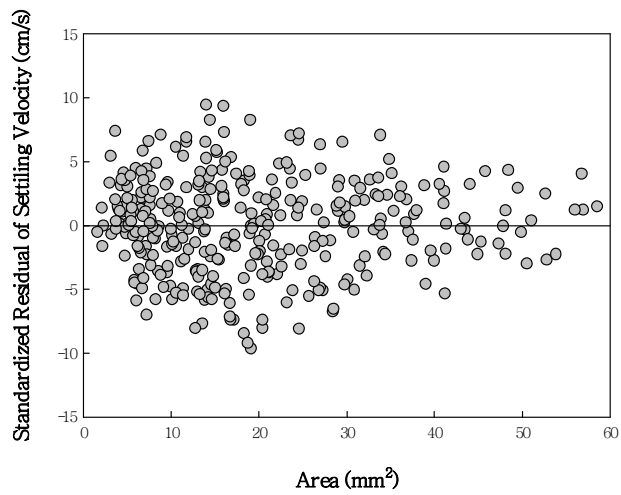


Fig. 5.13 Standardized Residual of Settling Velocity versus Area

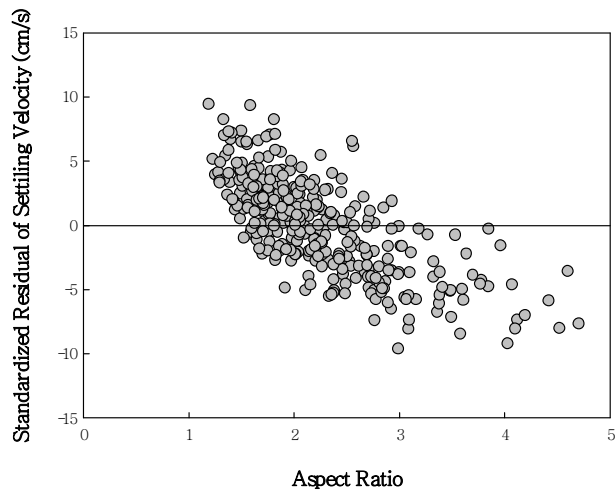


Fig. 5.14 Standardized Residual of Settling Velocity versus Aspect Ratio

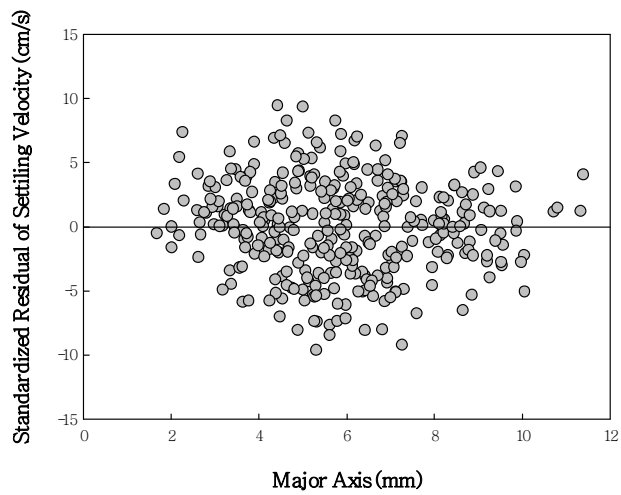


Fig. 5.15 Standardized Residual of Settling Velocity versus Major Axis

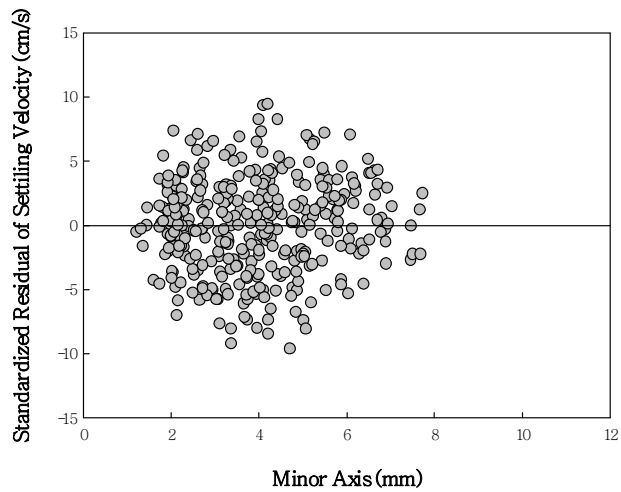


Fig. 5.16 Standardized Residual of Settling Velocity versus Minor Axis

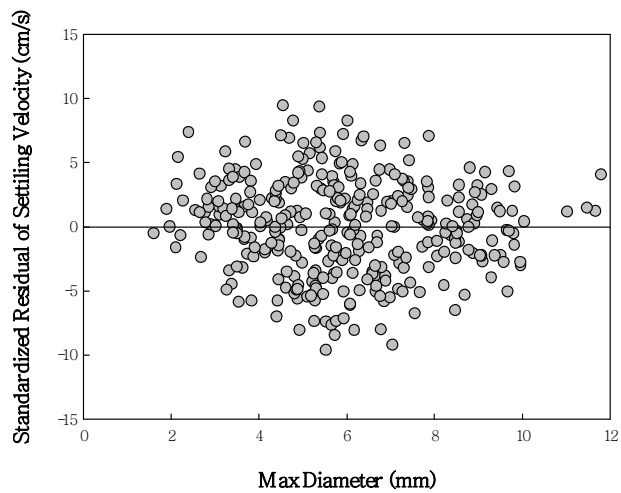


Fig. 5.17 Standardized Residual of Settling Velocity versus Max Diameter

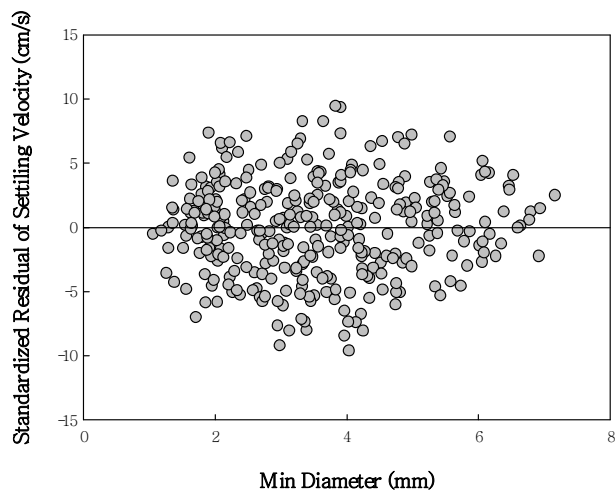


Fig. 5.18 Standardized Residual of Settling Velocity versus Min Diameter

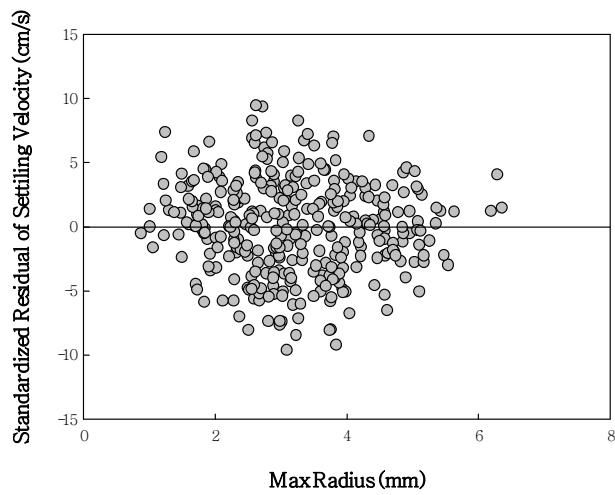


Fig. 5.19 Standardized Residual of Settling Velocity versus Max Radius

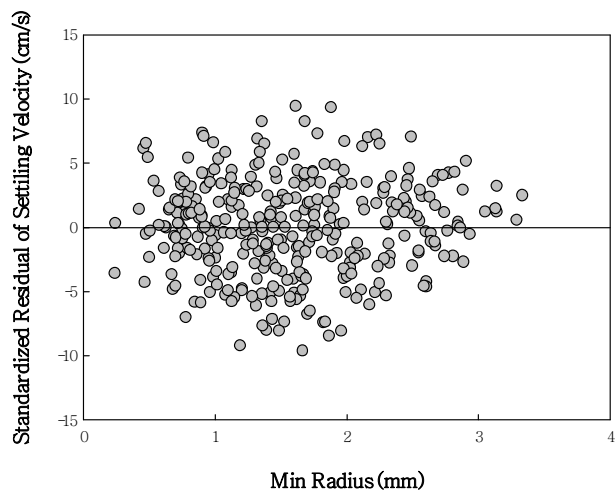


Fig. 5.20 Standardized Residual of Settling Velocity versus Min Radius

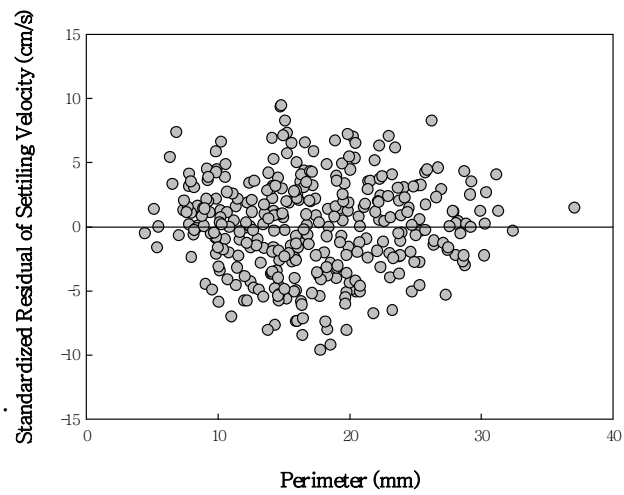


Fig. 5.21 Standardized Residual of Settling Velocity versus Perimeter

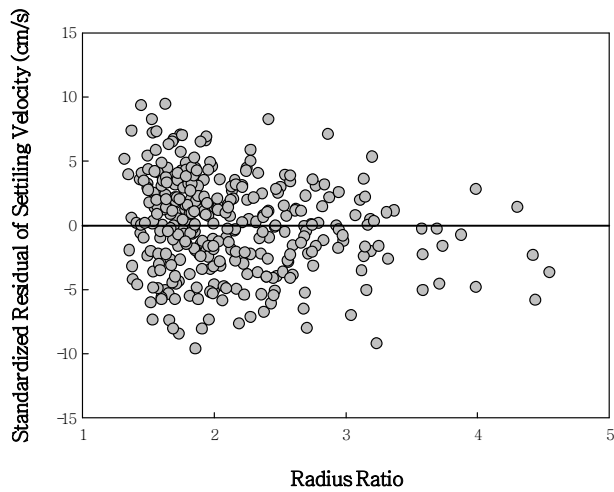


Fig. 5.22 Standardized Residual of Settling Velocity versus Radius Ratio

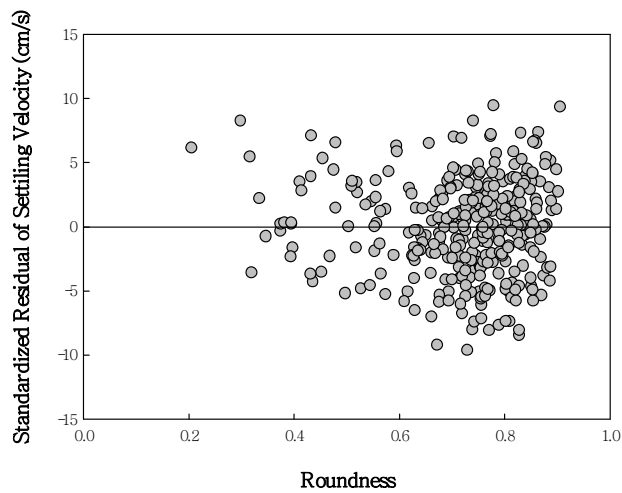


Fig. 5.23 Standardized Residual of Settling Velocity versus Roundness

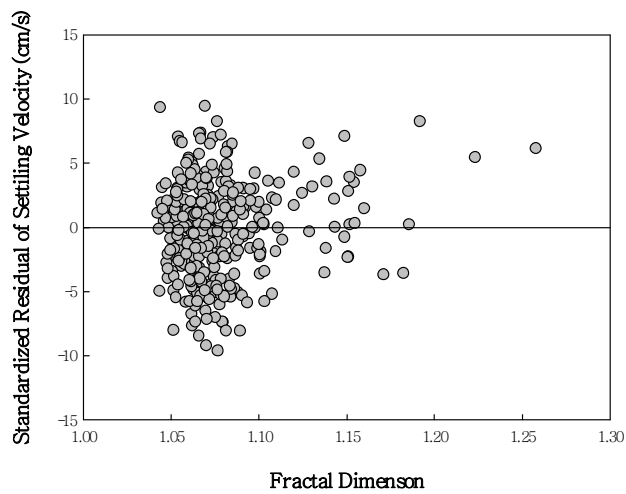


Fig. 5.24 Standardized Residual of Settling Velocity versus Fractal Dimension

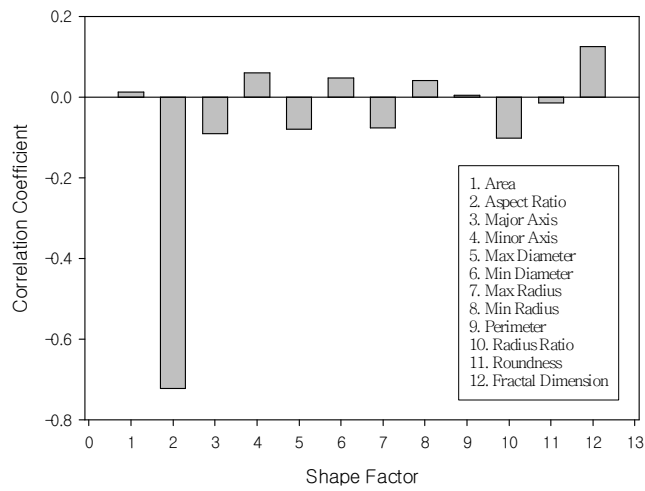


Fig. 5.25 Correlation Coefficient of Shape Factor with Residual of Settling Velocity

직경과 종횡비에 따른 침강속도의 관계는 Fig. 5.26과 같다. 같은 직경일 때 종횡비가 클수록 침강속도가 작게 나타났으며 이는 앞선 형상분류에 따른 결과와 같은 경향성을 보인다. 즉, 기존의 형상분류를 이용하지 않고 DIP를 통해 2차원 평면영상에서 획득한 정보만을 이용하여도 입자의 형상에 따른 침강속도를 설명할 수 있음을 의미한다. 특히, 기존의 형상 분류 방법을 이용하기 위해서는 입자의 장축, 중간축, 단축을 직접 측정하여야하기 때문에 다수의 입자에 대해 적용하기 어려우나 DIP를 통한 형상 측정 방법은 다수의 입자에 대해 매우 간편하게 형상을 측정 할 수 있기 때문에 현장에서 쉽게 적용이 가능한 장점이 있다.

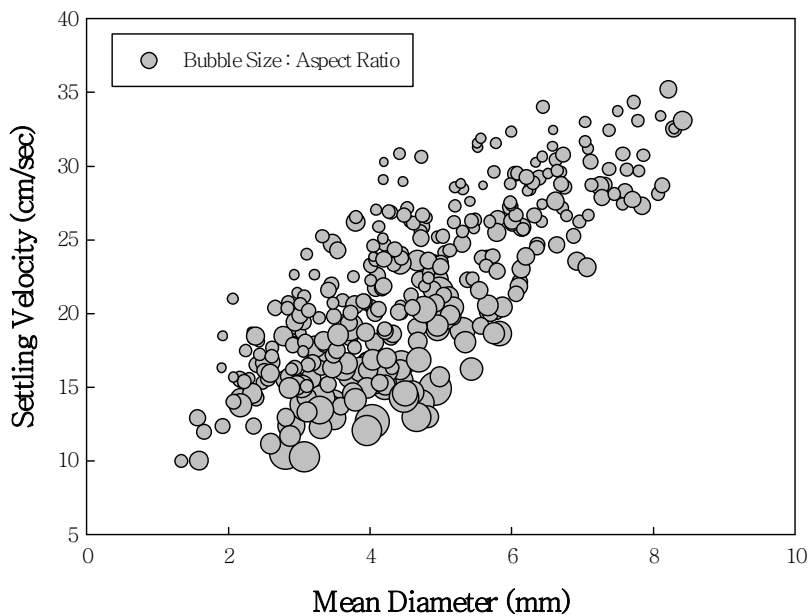


Fig. 5.26 Settling Velocity of Landfill Soil through Aspect Ratio

5.4 형상 특성을 이용한 침강속도 예측식 개발 및 검증

5.4.1 형상 특성을 이용한 침강속도 예측식 개발

형상특성을 이용한 침강속도 예측을 위해 매립토사 343개에 대한 직경, 중형비, 침강속도 측정결과를 바탕으로 Log-선형 회귀분석을 통해 다음과 같이 침강속도 예측식 (5.1)을 개발하였다.

$$V = 14.5 \sqrt{D_{mean} \left(\frac{D_{min}}{D_{max}} \right)} \quad (5.1)$$

여기서, V : Settling Velocity (cm/sec)

D_{mean} : Mean Diameter(mm)

$\frac{D_{min}}{D_{max}}$: Inverse of Aspect Ratio

개발된 예측식은 DIP기법을 통해 산정 가능한 평균직경과 중형비만을 이용하여 간편하게 적용이 가능한 형태이며 결정계수(R^2)는 0.82로 나타났다.

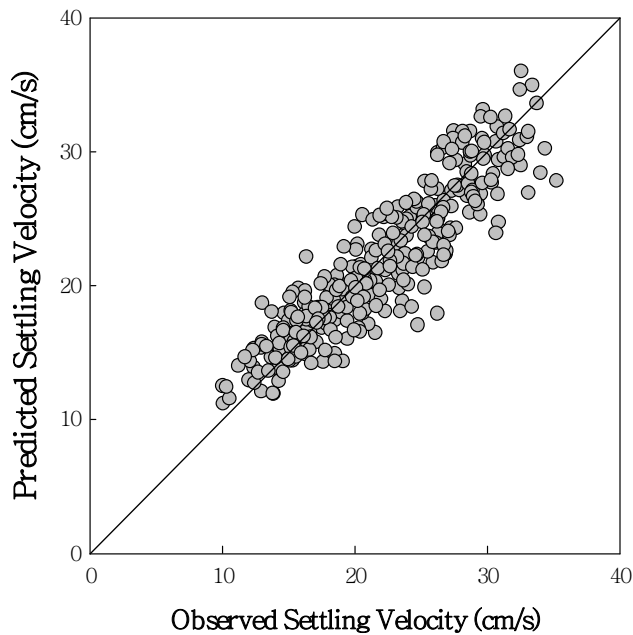


Fig. 5.27 Comparison of Observed/Predicted Settling Velocity

5.4.2 형상 특성을 이용한 침강속도 예측식 검증

개발된 침강속도 예측식의 검증을 위해 예측식의 개발에 사용되지 않은 타 지역의 화강풍화토 입자 106개를 이용하여 형상 및 침강속도를 측정하였다. 기존 제안된 침강속도 예측식 중 본 실험결과와 가장 유사하게 나타난 Rubey (1933)의 예측식과 본 연구에서 개발한 식으로 예측한 침강속도와 실제 측정한 침강속도를 비교하여 보았을 시 결정계수(R^2)는 본 연구의 예측식이 0.76, Rubey (1933)의 예측식이 0.61이며 따라서 본 연구의 침강속도 예측식은 적용성이 높은 것으로 판단된다.

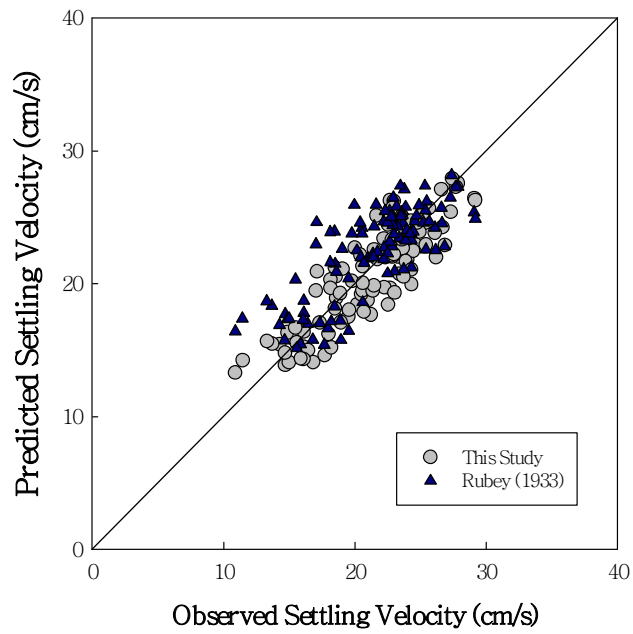


Fig. 5.27 Verification of Estimation Formula for 106 Samples

제 6 장 결론

본 연구에서는 기존의 침강속도 산정기법의 한계를 극복하기 위해 디지털 이미지 해석기법을 이용하여 입자의 형상 특성, 침강궤적 및 침강속도를 산정하였으며 침강궤적에 대한 분석 및 형상 특성에 따른 침강속도 예측식을 제안하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기존의 형상분류표에 따른 매립토사의 분류 결과 sphere, short rod, thick plate, ellipsoid의 형태로 구분된다.
2. DIP기법을 적용하여 입자의 형상 특성 및 침강거동을 분석하였다.
3. 매립토사는 침강 시 다양한 형태의 궤적으로 나타나며 입자의 직경이 증가함에 따라 수평방향의 이동량이 증가하였다.
4. 입자의 침강속도는 평균직경이 증가함에 따라 증가하였으며 같은 크기일 때 구형 입자보다 판형이나 타원형 입자의 침강속도가 감소하는 것으로 나타났다.
5. 입자의 형상은 6mm이하의 직경인 입자의 침강속도에 영향을 미치며 6mm이상인 경우 직경이 침강속도에 큰 영향을 미친다.
6. 입자의 형상 특성 중 직경과 종횡비가 침강속도와 관련이 있으며 이를 고려한 침강속도 예측식으로 $V = 14.5 \sqrt{D_{mean} \left(\frac{D_{min}}{D_{max}} \right)}$ 를 제안하였다.
7. 제안된 침강속도 예측식은 DIP기법을 통해 산정가능한 평균직경과 종횡비만을 이용하기 때문에 그 활용성이 높으며 예측식의 검증 및 타 연구의 예측식과의 비교 결과 우수한 적용성을 나타냈다.

참고 문헌

- Ahrens, J. P. (2000). A fall-velocity equation. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 126(2), 99-102.
- Camenen, B. (2007). Simple and general formula for the settling velocity of particles. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Cheng, N.-S. (1997). Simplified settling velocity formula for sediment particle. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2), 149-152.
- Choo, Y. W., Kim, J.-H., Park, H.-I., & Kim, D.-S. (2012). Development of a New Asymmetric Anchor Plate for Prefabricated Vertical Drain Installation via Centrifuge Model Tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Coster, M., & Chermant, J.-L. (2001). Image analysis and mathematical morphology for civil engineering materials. *Cement and Concrete Composites*, 23(2), 133-151.
- Dietrich, W. E. (1982). Settling velocity of natural particles. *Water resources research*, 18(6), 1615-1626.
- Ferguson, R., & Church, M. (2004). A simple universal equation for grain settling velocity. *Journal of Sedimentary Research*, 74(6), 933-937.
- Fernlund, J. M. (1998). The effect of particle form on sieve analysis: a test by image analysis. *Engineering Geology*, 50(1), 111-124.
- Fernlund, J. M. R. (1998). The effect of particle form on sieve analysis: a test by image analysis. *Engineering Geology*, 50(1-2), 111-124. doi: 10.1016/S0013-7952(98)00004-0
- Firdaus, M. L., Alwi, W., Trinoveldi, F., Rahayu, I., Rahmidar, L., & Warsito, K. (2014). Determination of chromium and iron using

- digital image-based colorimetry. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 298-304.
- Gibbs, R. J., Matthews, M. D., & Link, D. A. (1971). The relationship between sphere size and settling velocity. *Journal of Sedimentary Research*, 41(1), 7-18.
- Goldstein, S. (1929). The steady flow of viscous fluid past a fixed spherical obstacle at small Reynolds numbers. Paper presented at the Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.
- Hedan, S., Cosenza, P., Valle, V., Dudoignon, P., Fauchille, A.-L., & Cabrera, J. (2012). Investigation of the damage induced by desiccation and heating of Tournemire argillite using digital image correlation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 51, 64-75.
- Helm, J., & Suleiman, M. (2012). Measuring soil-structure interaction on laterally loaded piles with digital image correlation. *Procedia IUTAM*, 4, 66-72.
- Janke, N. (1965). Empirical Formula for Velocities and Reynolds' Numbers of Single, Settling Spheres: NOTES. *Journal of Sedimentary Research*, 35(3).
- Krumbein, W. C., & Pettijohn, F. J. (1938). *Manual of sedimentary petrography*.
- Ladenburg, R. (1907). Über den Einfluß von Wänden auf die Bewegung einer Kugel in einer reibenden Flüssigkeit. *Annalen der Physik*, 328(8), 447-458.
- Le Roux, J. (1996). Settling velocity of ellipsoidal grains as related to shape entropy. *Sedimentary Geology*, 101(1), 15-20.

- Lee, I. K., Ingles, O. G., & White, W. (1983). Geotechnical engineering. Boston: Pitman.
- Lee, K.-D., Baek, S.-C., Hong, S.-Y., Kim, Y.-H., Na, S.-i., & Lee, K.-B. (2013). Classification of Soil Desalination Areas Using High Resolution Satellite Imagery in Saemangeum Reclaimed Land. 한국토양비료학회지, 46(6), 426-433.
- Lindqvist, J., & Åkesson, U. (2001). Image analysis applied to engineering geology, a literature review. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 60(2), 117-122.
- Mora, C., Kwan, A., & Chan, H. (1998). Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. Cement and Concrete Research, 28(6), 921-932.
- Oseen, C. (1910). Ueber die stokes' sche formel, und iiber eine verwandte aufgabe in der hydrodynamik. Ark. Math. Astronom. Fys, 6.
- Persson, A.-L. (1998). Image analysis of shape and size of fine aggregates. Engineering Geology, 50(1), 177-186.
- Rouse, H. (1937). NOMOGRAM FOR THE SETTLING VELOCITY OF SPHERES. Report of the Committee on Sedimentation, 57.
- Rubey, W. W. (1933). Settling velocity of gravel, sand, and silt particles.
- Stokes, G. G. (1851). On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums (Vol. 9): Pitt Press.
- Wu, W., & Wang, S. S. (2006). Formulas for sediment porosity and settling velocity. Journal of Hydraulic Engineering, 132(8), 858-862.
- 김성준, 리. 김. (2009). 구형입자의 다양한 응집형태에 따른 층류 및 난류에서의 침강특성. 한국도시환경학회지, 9(1), 23-29.
- 김종우. (2007). 부유된 광물성 입자의 침강 속도에 관한 실험. 韓國水資源學會論文集 = Journal of Korea Water Resources Association, 40(9),

723-734.

황병호, 홍성우, & 황규남. (2008). 점착성 퇴적물의 침강속도에 미치는 염도의 영향. 한국수자원학회 2008년도 학술발표회 논문집, 2008(5), 1813-1817.